



TITLE:

GPSを活用した情報化施工技術の実用化・高度化に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

村田, 晔昭

CITATION:

村田, 晔昭. GPSを活用した情報化施工技術の実用化・高度化に関する研究. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-07-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12382>

RIGHT:

許諾条件により本文は2009-12-01に公開

GPS を活用した情報化施工技術
の実用化・高度化に関する研究

平成 21 年

村田 曄昭

目 次

1. 研究の背景と目的	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
2. 衛星測位技術(GPS)の現状と動向	9
2.1 GPS の概要	9
2.2 代表的な GPS 測位の原理(1)－単独測位法	15
2.3 代表的な GPS 測位の原理(2)－干渉測位法	21
2.4 GPS による測量	31
2.5 GPS 関連のインフラストラクチャ	35
2.6 GPS 関連技術の動向	38
3. IT活用情報化施工の現状と動向	44
3.1 はじめに	44
3.2 情報化施工の現状	44
3.3 情報化施工を巡る国内外の動向	53
4. 情報化施工システムの開発	59
4.1 はじめに	59
4.2 大規模土工事における情報化施工システムの構築	60
4.3 盛土締固め管理システムの開発	78
4.4 無人化施工システムの開発	87

5. 情報化施工における管理システムの高度化	91
5.1 はじめに	91
5.2 盛土締固め管理システムの開発背景と管理基準値の明確化	94
5.3 盛土層厚管理のためのデータ処理法の提案	99
5.4 締固め管理システムを利用した沈下計測による盛土品質評価法の提案	112
5.5 規定転圧回数の合理的な更新方法の提案	117
5.6 締固め管理システムの山間部における適用性向上に関する提案	130
5.7 リアルタイム GPS 測位の新たな精度向上策に関する提案	138
5.8 海外工事における GPS の活用方法の提案	148
 6. 本論文の結論と今後の展望	 156
6.1 研究成果のまとめ	156
6.2 情報化施工技術の展望	162
 謝辞	 169

1. 研究の背景と目的

1.1 研究の背景

近年、コンピュータや通信技術などの情報化分野で急速な技術革新が進んでおり、建設産業でもこれらの情報化技術(IT: Intelligent Technology —最近では Communication を加えて ICT と称されることもある)を活用した合理的な生産システムの導入・普及の促進により、典型的な労働集約型産業から知識・技術集約的産業へ、そしてより魅力的な産業へと変革していくことが期待されている。いわゆる「情報化施工システム」の導入により建設生産性の革新を目指そうという動きである。

土木分野で「情報化施工」というと、これまでは米国のテルツァギーが提唱した土質における「観測施工」の系統を指していた。しかし、国土交通省が設立した、情報化施工促進検討委員会(平成 9～11 年度)から出された「情報化施工のビジョン」における定義では、情報化施工とは、情報化技術を建設施工に適用して、多様な情報の活用を図ることにより、施工の合理化をはかる生産システムとなっている。同時に、建設 CALS/EC (Continuous Acquisition and Life-cycle Supports/ Electronic Commerce:公共事業支援統合情報システム)の取り組みとあわせ、調査、計画、設計、管理段階も含めた一連の流れの中での建設事業の効率化を期待して取り組まれているものとされている。また、国交省国土技術政策総合研究所が中心となり実施している施工の情報化と業務改善研究の中でも、情報化施工技術は、土木施工における受発注者間の情報共有を促進し、事業の効率化、コスト低減、品質向上を目指すものと位置付けられ、土木構造物の設計から完成後の維持・管理までの一貫した情報管理技術を確立するために不可欠な空間情報の取得利用技術の研究がなされている¹⁾。要するに、情報化施工は、調査、設計、施工、管理といった建設工事の一連の過程に適切な情報技術を導入し、情報の共有化と利活用を通して、工事の効率性、安全性、信頼性及び施工品質を向上させることを目指す技術である。

また、雲仙・普賢岳の噴火後の復興工事(1994 年)や同じく火山災害となった有珠山の復旧工事(2000 年)などで導入された無人化施工システム²⁾や、兵庫県南部地震(1995 年)や新潟中越地震(2004 年)、岩手・宮城内陸地震(2008 年)の被災地における復興工事に、測量基準点を必要としない GPS 搭載の建設機械システムに大きな期待が寄せられたことから、ITを活用した施工システムの重要性、必要性は明らかである。

このような情報化施工や無人化施工を実施する際、前提となるのが、現場の状況の的確な把握であり、そのためには、高精度かつリアルタイムの高い測量技術が要求される。

GPS(Global Positioning System)は、このような要件を満たす最有力の測量技術であり、近年各地で試みられている情報化施工の中核技術になっている。周知の通り、GPS は地球を周回する人工衛星を利用した測位システムであり、米国・国防総省が中心となって 1970 年代より開発を進めてきた軍事技術である。米国が GPS の初期運用の開始と民生利用への開放を正

式に宣言したのは1993年であったが、実際には1980年代後半より民生利用は始まっている。

わが国では、1988年に国土地理院が地殻変動の観測に足る高精度GPS測量に成功し、1988～1990年に、建設分野への検討として実施された官民連帯共同研究「衛星測量システムの建設事業への応用技術の開発」が実施された。

その後、建設工事への利用でも、長大法面の地盤変位の計測や出来高測量などへの先駆的な利用事例が蓄積されていった。1993年には、大規模海洋工事に、GPSと音響測深機を統合した海底地形測量システムが登場し、RTK-GPS(Real Time Kinematic :2台の受信機と通信によるリアルタイム測量)が実用化され、多くの工事測量に利用されるようになった。

また、1994年には、雲仙・普賢岳の噴火に伴う復興工事に、RTK-GPSを利用した初の無人化施工が試行され、マスメディアでも取り上げられ大きく報道された。さらに、1995年の阪神・淡路大震災では、復旧・復興測量の広範な分野にGPSが導入され、その効力を多くの国民が知ることとなった。これらの事柄によって、GPSの固定観測局(電子基準点)の意義や、電子基準点からGPS測量を高精度化、リアルタイム化するための情報提供を行う意義が明らかにされ、その後、電子基準点は大幅に増強された。現在では、電子基準点での受信情報がリアルタイムに提供され、これを利用したRTK-GPSが可能になっている。

このように、高度情報化社会の潮流の中で、情報化施工は建設業界全体の必須の課題であり、GPSはこのための不可欠な要素技術になっている。

しかしながら、GPSを利用した情報化施工システムの実現場への導入に当たっては、建設分野特有の様々な問題点があった。

本研究では、これらの問題点とそれを解決するための対策の検討を行った。

1.2 研究の目的

本研究の目的は次の通りである。

- ① 情報化施工システムの構築と適用性の把握、課題の抽出
- ② 抽出課題への対策
 - a. 盛土締固め管理システムの実用化、高度化
 - ・ 締固め管理手法における品質管理基準値の明確化³⁾
 - ・ 締固め管理システムにおける盛土層厚管理手法の提案
 - ・ 締固め管理システムを利用した沈下計測による盛土品質評価法の提案⁴⁾
 - ・ 規定転圧回数の合理的な更新方法の提案
 - ・ 衛星データ受信環境劣悪地帯での適用法の提案⁵⁾
 - b. GPSの利活用、高性能化
 - ・ リアルタイムGPS測位の高度化
 - ・ 海外工事一信頼できる測量基準点、水準点のない地域でのGPSの活用

以下、その概要を説明する。

1.2.1 情報化施工システムの開発と適用性の把握

GPS 等 IT を利用した情報化施工システムを順次開発し、実現場での試導入により適用性を検討した。また、問題点、課題を抽出した。開発した主なシステムは以下のとおりである。

① ワンマン測量システム

特殊技能がない作業員でも、RTK-GPS により、現場出来形測量、丁張り作業が容易に行えるシステムを開発した。

② 盛土締固め管理システム

本システムは、締固め機械の運転室内のパソコン画面上に GPS によって計測された振動ローラの移動軌跡から算出した盛土の転圧回数を表示することで、盛土の品質管理を行いながら施工することができるものである。

③ 3次元建設機械制御システム

本システムは、3次元設計データと RTK-GPS によって測定された重機の位置情報をリアルタイムに照合させ、設計データどおりに油圧をコントロールし建設機械の走行、位置決め、ブレードやバケット等の自動制御を行うシステムである。これにより従来、種々の工程を踏まえて行われてきた作業(丁張り等)を省力化し、かつより高い精度で効率的な施工を実現できるようになった。

④ 無人化施工システム

無人化施工システムは、人間が立ち入れない危険な作業現場で遠隔操作による建設機械で作業を行う施工システムで、1994 年から雲仙・普賢岳の砂防事業において、旧建設省の「試験フィールド制度」を活用して、実施が始まったものである。無人化施工では重機の運転は無線遠隔によって行われ、オペレータは、ダンプトラック、バックホウ、ブルドーザなどに搭載されたカメラや GPS によって作業状況の確認、機械の位置決めや他の建設機械との位置関係を掌握して、建設機械を操作している。

1.2.2 情報化施工システムにおける課題と対策

現場での試導入の結果、『盛土締固め管理システムの実用化、高度化』における 5 つの課題と、より広範囲の現場適用のための、『GPS の利活用、高性能化の検討』における 2 課題の合計 7 つの課題が抽出された。

それらの課題の概要と本研究により、提案した内容を以下に記す。

(1) 締固め管理手法における品質管理基準値の明確化

締固め管理システムによる新しい盛土の施工管理方法として提案した手法の実践、普及に当たり、信頼性を確保しつつ生産効率の向上のための合理性を発揮するためには、この

手法特有の長所、短所を考慮した管理基準を設定する必要があった。そこで、本手法と従来法の両者を併行した施工試験を実施し、施工管理基準値を設定した。

(2) 盛土層厚管理のためのデータ処理法の提案

締固め回数の管理とともに重視される盛土の層厚管理においては、GPS の測定データのバラツキ、地形の局所的な凹凸や盛土材料の特性によって所望のデータの採取が困難であった。このため、データの取得基準、データの処理方法を提案して、現場実験を実施するとともに、実工事でその有効性を確認した。

(3) 締固め管理システムを利用した沈下計測による盛土品質評価法の提案

締固め度を評価する方法として、締固め作業によって生ずる地表面の沈下量を代用特性として用いる方法が提案されていた。本研究では、リアルタイム GPS 測位により、常時締固め機械の3次元座標が求められることに注目し、施工中に順次取得される標高データから沈下量－締固め量－盛土品質を推定することの可能性に関して、実験により確認した。

(4) 規定転圧回数の合理的な更新方法の提案

大規模土工事では、切土場の移動などにより盛土材料の品質が変化する可能性がある。基本的に締固め管理システムでは、材料が変わる毎に転圧試験(試験施工)の再実施が必要となるが、これによる転圧回数の妥当性確認はコスト・工期的に大きな負担となっている。そこで本研究では、締固め管理システムを真に施工の合理化につなげるために、現場転圧試験に代わる室内のモデル試験方法を提案し、現場実験により有効性を検証した。

(5) 締固め管理システムの山間部における適用性向上に関する提案

盛土締固め管理システムの適用場所としてはリアルタイム GPS 測位が確実にこなえることが条件となる。しかし、実際の工事現場で全域にわたって良好な条件を備えた場所は少ない。このため、精度は低下するが計測データの欠落がほとんど生じない、GPS 単独測位法の適用実験を行い、その有効性を検証した。

(6) リアルタイム GPS 測位の新たな精度向上策に関する提案

リアルタイム GPS の代表的手法である RTK-GPS を超える精度向上ニーズに応えるため、新しい誤差補正技術である FKP(Flächen Korrektur Parameter = Area Correction Parameters)方式の応用と、複数の RTK 基準局の同時利用によって高精度化を図る手法の有効性を実験により検証した。

(7) 海外工事における GPS の活用方法の提案

海外、特に発展途上にある国での建設工事における情報化施工技術の導入研究に際して、GPS 測量実施の前提となる国家基準点、水準点の信頼性は非常に低い。総延長400km に及ぶ長距離高速道路の施工にあたって、合理的かつ精度の高い工事用の測量インフラの構築を行った。本研究で提案した事項は、以下の2つである。

① 広域における低信頼公的基準点の取扱いと現場運用方法

② 長距離 RTK-GPS 測定の適用性と活用方法

図 1.1 に研究のフローを示し, 図 1.2 に本論文の構成を示す。

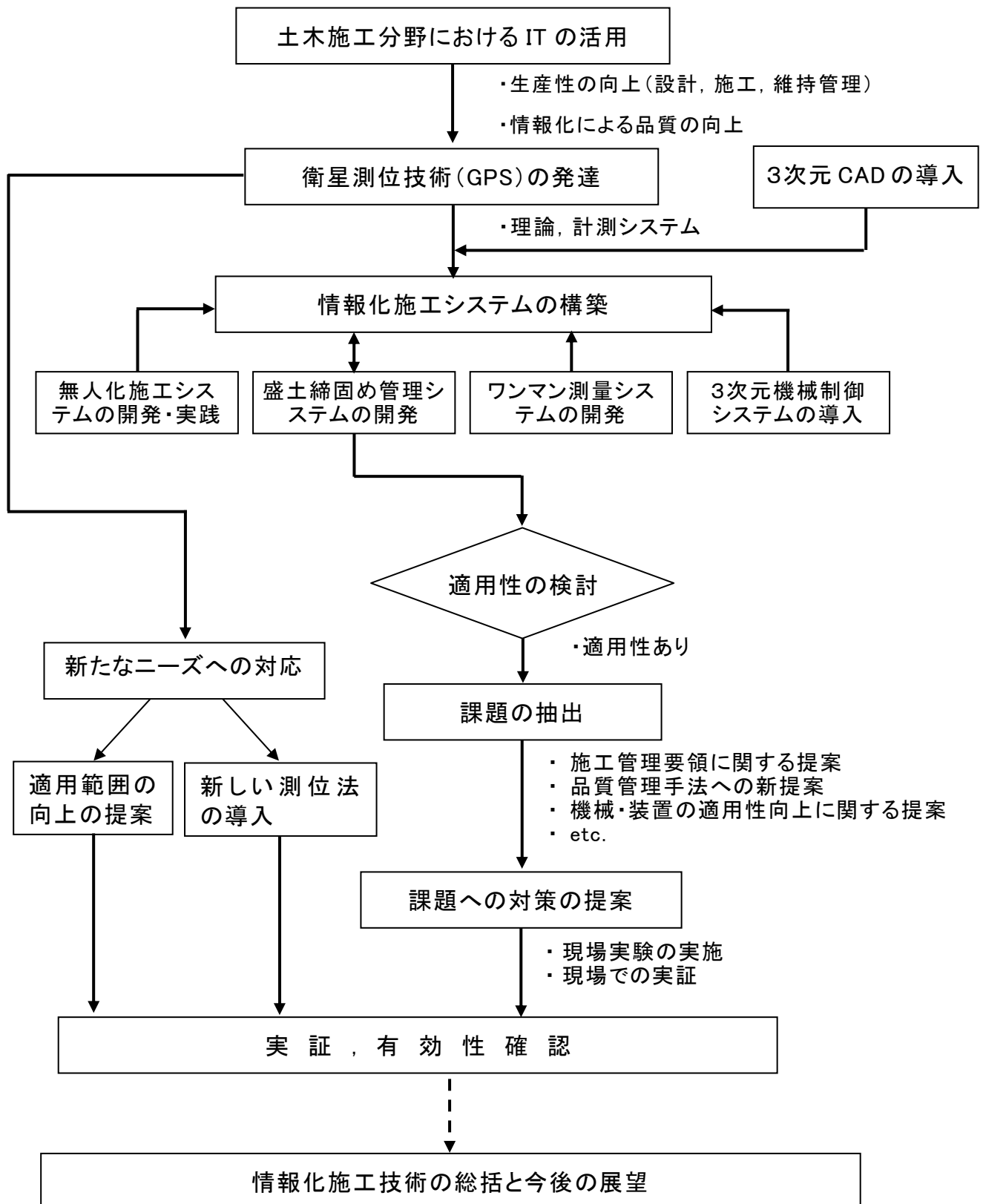


図 1.1 研究フロー

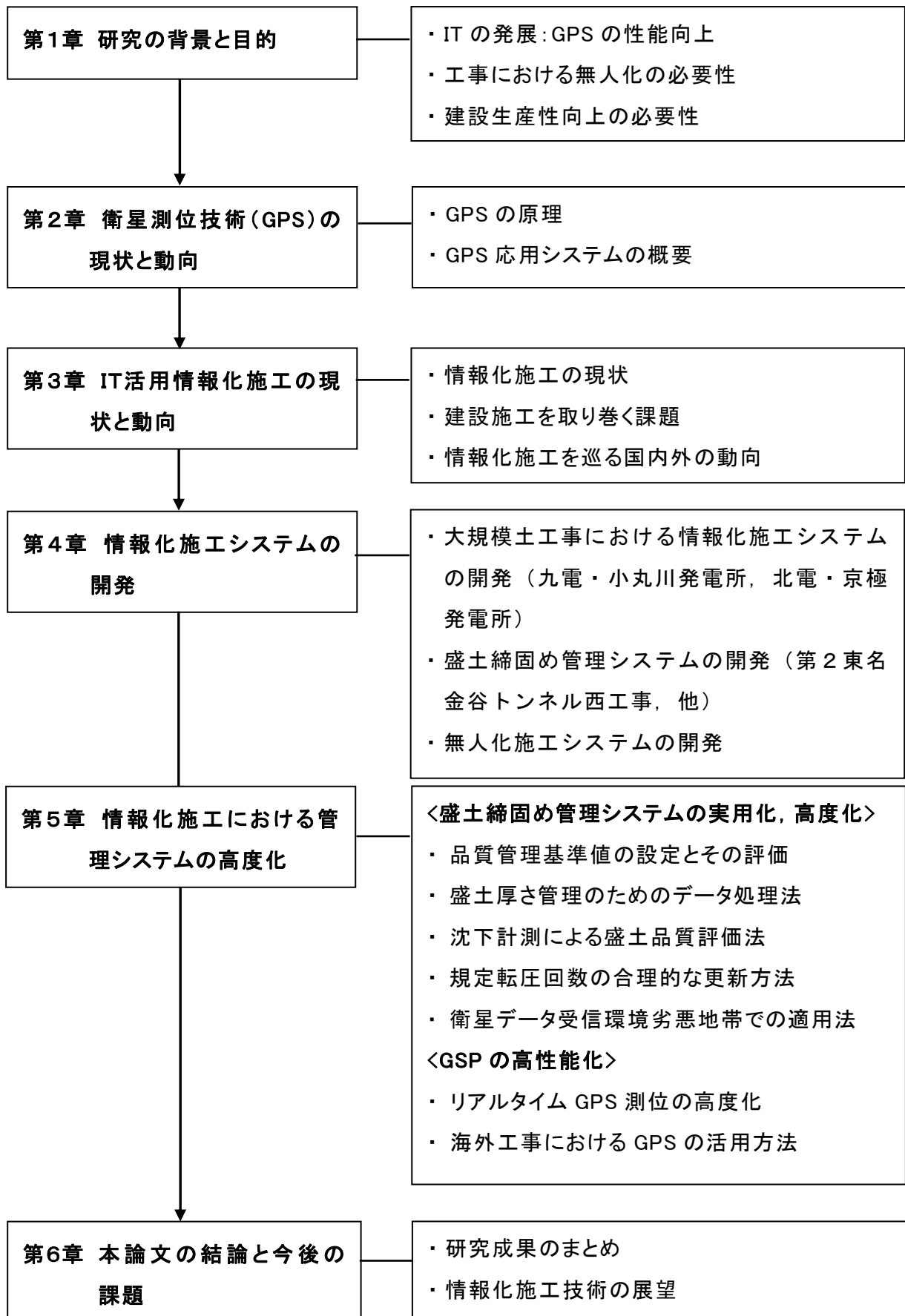


図 1.2 本論文の構成

参考文献

- 1) 「情報化施工のビジョンー21 世紀の建設現場を支える情報化施工ーについて」国土交通省・情報化施工促進検討委員会, pp.1-1～1-2, 2001.
- 2) 宮嶋ほか, 建設機械の遠隔操作技術, 鹿島建設株式会社技術研究所年報, pp.94～95, 1994.
- 3) 横田ほか, 「施工規定方式における品質管理基準値の設定とその評価」, 地盤工学会誌「土と基礎」, Vol.50, No.9, pp.7～9, 2002.
- 4) 藤井ほか, 「GPSを利用した締固め管理システムの検討ー大規模工事における情報化施工に関する検討」, 地盤工学会第 37 回研究報告会, pp.1319～1320, 2002.
- 5) 横田ほか, 「GPS締固め管理システムの山間部における適用性向上に関する一考察」, 地盤工学会第 36 回研究報告会, pp.1411～1412, 2001.

2. 衛星測位技術(GPS)の現状と動向

2.1 GPS の概要

本章では、情報化施工の土台を担っている衛星測位技術(GPS)について、その基本原理や現状技術、課題を概観し、情報化施工技術の研究を開始するに至った背景を整理した。また、情報化施工の将来的な発展や新たな建設生産性の革新に向けた活動の基盤となる衛星測位技術(GPS)周辺の最新動向をまとめた。

2.1.1 GPS の開発経緯

1957年に人類が初めて地球を周回する『スプートニク』を打ち上げてから人工衛星の実用化が始まり、地球観測衛星や気象衛星によるリモートセンシング技術などの発達とともにGPS(Global Positioning System 全地球測位システム)が誕生した。GPSはその名のとおり、地球上のどんな場所でも自分のいる位置を計測できるシステムであるが、GPSの登場以前にもいくつかの広域測位システムは存在した。

その一つは電波測位システムといわれるもので、第二次世界大戦中に発明されたレーダもその代表例だが、中波から長波(数100kHz~2,000kHz)帯電波を使い、最大数100kmから数1,000km程度の有効測定範囲を持つデッカ(DECCA)やロラン(LORAN)、超長波帯の電波を利用し全世界をカバーするオメガ(OMEGA)というシステムが1970年代から運用されている。これらのシステムの測定精度は、数100mから数kmであり、主に船舶の安全航行のために使われてきたが、GPSの登場によってこれらのシステムを使用する船舶も急激に減ってきている。

また、GPS登場以前にも人工衛星を利用した測位システムとして、1964年に衛星航法システムNNSS(Navy Navigation Satellite System:海軍航法衛星)が米国海軍で開発されている。約1,000kmの極・円軌道を周期約100分で周回するNNSS衛星には、150MHz帯、400MHz帯の送信機が搭載されている。このシステムは、NNSS衛星から送信される電波を受信するときに、衛星が近づくときは周波数が高くなり、遠ざかるときは低くなるというドップラー効果を利用し、その周波数の変化を測定して衛星軌道からの距離計算を数回繰り返して測位を行うという原理である。静止している場合の精度は、100m程度であった。しかし、NNSS衛星の数が少なかったために測位に時間がかかり、また、測位できる時間帯にも制約があったこと、被測定物が移動すると測定精度が劣化するという欠点もあり、民生用としてはほとんど利用されなかった。

このような状況下で次世代の測位システムとして1970年代から米国で開発されてきたのがGPSである。GPSは24個以上の周回衛星で地球の周りを覆うことによって、時間と場所によらず地上での3次元測位を可能にしたシステムである。元来、軍事用に開発されたシステムであるが、民間にも利用が開放された。1993年12月の正式運用開始宣言後の民生分野における普及は著しく、わが国でもカーナビゲーションや測量等幅広く利用されており、今や高度位置情報社会を支える基盤として大きな役割を担っている。

2.1.2 測位方式の種類

GPS による測位方式には、1 台の GPS 受信機だけを用いる単独測位と、GPS 受信機を 2 台以上用いて、誤差を取り除き、測定精度を向上させる相対測位がある。

各種測位方式を図 2.1 に示す。

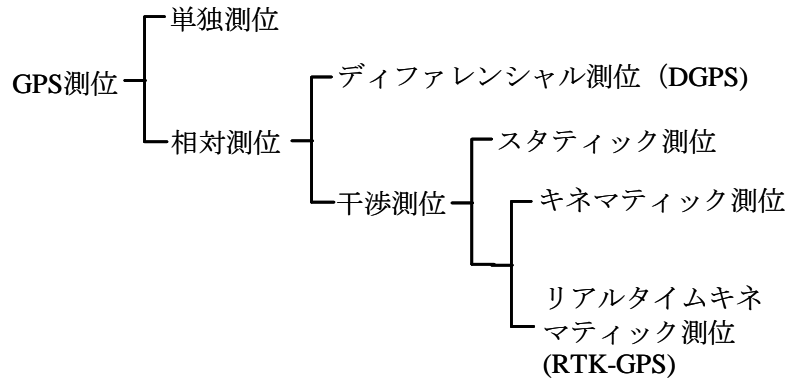


図 2.1 GPS 測位方式の種類

単独測位は GPS の最も基本的な測位方法であり、GPS 衛星から発信される電波に重畳されている信号(コード)を使って衛星から受信機までの距離を算出し、衛星の位置情報をもとに受信機の3次元位置をリアルタイムに計算する方法である。衛星から受信機までの伝播経路上に存在する様々な要因の影響などにより測位精度は 10m 程度であるが、測位機構は簡単で受信機も安価であり、カーナビゲーションなど、幅広く利用されている。

相対測位の基本は2台の GPS 受信機を用いて2点間の相対的な位置関係(基線ベクトル)を求めるというものである。この方式は、衛星－受信機間の伝播経路上の電離層や対流圏の影響による電波の遅延を含めた各種の誤差が打ち消しあうため、高精度で測位することができる。相対測位のうちディファレンシャル測位は単独測位受信機を2台用い、1台は位置座標が既知の点に設置し、固定局として衛星電波を受信して測位誤差を観測する。その誤差値を補正值として他の1台の受信機(移動局)に送信する。移動局の受信機では補正值によって測位精度を向上させるという方式である。測位精度は数十 cm～数 m になる。

干渉測位は衛星からの電波(搬送波)の波数を測って高精度に基線ベクトルを計算する方式であるが、その測位原理は極めて複雑である。干渉測位用受信機は搬送波位相の検出と波数の積算機能を有す特殊な受信機である。干渉測位では既知点と未知点に GPS 受信機を設置して、衛星から送信される搬送波を同時に観測してデータ処理により既知点から未知点までの基線ベクトルを求める。基線ベクトルの測定精度は基線長に対して数 ppm であり、極めて高精度が得られる。干渉測位には未知点(測定点)に受信機を固定して測るスタティック方式と測定点を短時間に移動しながら測るキネマティック測位とがある。データ処理は受信機に記録した衛星電波観測データをパソコンに転送して基線解析ソフトウェアで計算する後処理方式である。しかし、既知点受信機から観測データを通信システムにより未知点受信機へリアルタイム

に送り、未知点受信機で基線解析をリアルタイムに行う方式がある。これをリアルタイムキネマティック方式と呼び、情報化施工システムの実現を可能とした測位方式である。

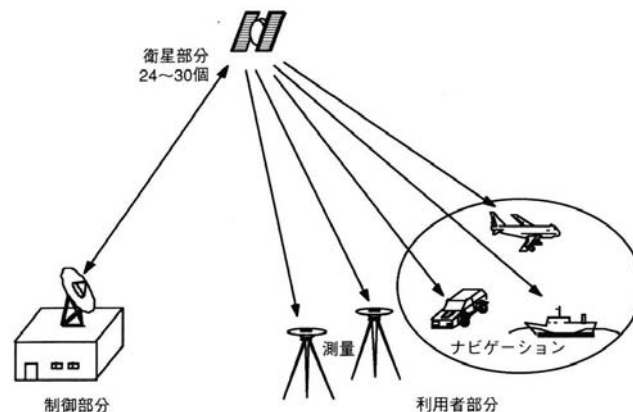
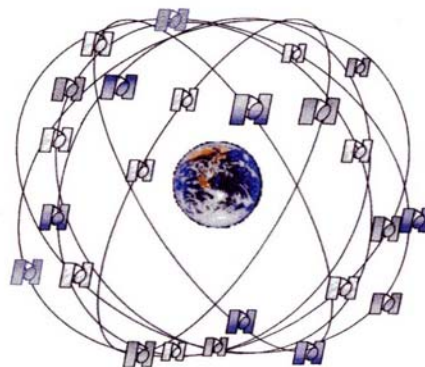
各種測位方式の比較を表 2.1 に示す。

表 2.1 GPS 測位の各種方式の比較

仕様	方式	単独測位	相対測位		
			ディファレンシャル測位 (DGPS)	干渉測位	
				スタティック測位	キネマティック測位 リアルタイムキネマティック測位 (RTK-GPS)
観測時間		リアルタイム	リアルタイム	20分～数時間	1秒～
水平精度		約10m	0.5m～2m	5mm+1ppm・D (Dは基線長)	20mm+2ppm・D (Dは基線長)
観測信号		コード	コード	搬送波	搬送波
特 徴		小型・安価	中程度の精度が容易に得られる	静止観測 高精度測位 後処理	移動体観測 高精度測位 後処理
用 途		ナビゲーション 自動車 船舶 携帯電話等	高精度ナビゲーション 自動車 船舶 飛行機	基準点測量 地殻変動観測	移動体の軌跡観測 移動体高精度測位 応用測量 機械制御

2.1.3 GPS の構成

GPS は図 2.2 に示すように衛星部分、制御部分、利用者部分の 3 要素により構成される。

図 2.2 GPS の構成¹⁾図 2.3 GPS 衛星の軌道概要²⁾

(1) 衛星部分

図 2.3 に示すように 24 基の衛星(予備衛星を含み 31 基:2008.10 現在)で構成されている。衛星の軌道面は 6 面あり、各軌道面に 4 個ずつ衛星が配備されている。軌道面と赤道面がなす角度(軌道傾斜角)は 55° である。衛星軌道は円軌道であり、軌道半径は約 26,561km、約 11 時間 58 分 2 秒の周期で地球を周回している。GPS 衛星はルビジウム(Rb)やセシウム(Cs)を用いた原子時計を搭載しており、極めて正確な周期で電波と信号を地上に向けて送信している。表 2.2 に GPS 衛星の諸元を示す。

表 2.2 GPS 衛星の主な諸元 ²⁾

項 目	内 容
衛星個数	4 個×6 軌道面
衛星設計寿命	7.5 年
軌道半径	26, 561km
周回周期	約 11 時間 58 分 2 秒
軌道傾斜角	55°
搭載原子時計	セシウム時計 2 台 ルビジウム時計 2 台

(2) 制御部分

GPS 衛星の運航状況を監視、制御するための地上施設であり、米国のコロラドスプリングスに主管制局が、他に 4 局の追跡局(モニター局)がある。運航状況の監視とは、GPS 衛星の軌道追跡と衛星上の原子時計の誤差チェックである。また、制御とは、衛星の軌道修正と原子時計の補正データなどの更新であり、軌道追跡によって得られた最新の軌道情報と原子時計の補正データを定期的に更新し、衛星から航法メッセージとして送信している。

(3) 利用者部分

GPS 受信機のことであり、GPS 電波を受信するアンテナと測位計算を行う受信機本体とで構成される。アンテナと受信機が一体化した装置となっているタイプとアンテナと受信機が切り離されてその間をケーブルで結ぶタイプとがある。GPS 受信機には大きく分類すると単独測位用受信機と干渉測位用受信機とがあり、表 2.1 に示す各種測位に用いられる。

2.1.4 GPS の電波と信号

GPS 衛星から送信される電波は L1 波(中心周波数:1, 575.42MHz)、L2 波(中心周波数:1, 227.6MHz)という 2 種の周波数帯の搬送波である。2 つの周波数帯を用いるメリットは、電離層を通る電波はその周波数によって伝播速度に違いを生ずるため、同じ経路を異なる周波数帯の電波を通すことによって電離層遅延量を推定し除去することができるためである。このようなメ

リットがあるため、長距離の基線測定ではほとんどの場合 2 周波数帯の観測を行っている。

これらの搬送波に乗せて受信機から衛星までの距離を測るため 2 種類のデジタル信号が変調して送信されている。これらは C/A コード (Clear and Acquisition), P コード (Precision) と呼ばれる。これらのコードは不規則な 0 と 1 の系列であり、1 周期毎に同じパターンを繰り返す。これをコードパターンと呼び衛星毎に異なるパターンで信号を送信しているため、受信機では衛星毎に電波信号を識別できるようになっている。C/A コードは繰返し周期が $1\text{ms}(10^{-3}\text{s})$ であり、電波の進む距離に換算すると約 300km である。C/A コードは民間に利用が開放されているが、L1 波にしか乗っていない。一方、P コードは L1 波、L2 波の両方に乗っていて、繰返し周期は 1 週間である。軍事機器の専用コードであったため、従来は民間に非公開であったが、現在は公開されている。しかし、その後 P コードを再び秘匿するために W コードと呼ばれる信号を付加する操作が執られ、現在では新しく Y コードと呼ばれるコードとなっている。Y コードは秘匿されており米軍関係者のみが利用可能である。

さらに L1 波には航法メッセージ (navigation message) と呼ばれるデータが C/A コードに重畳されて送信されている。内容は衛星軌道情報や衛星時計の補正情報等のデータである。表 2.3 に GPS の電波と信号について、図 2.4 に L1 波と C/A コード及び航法メッセージについてまとめる。

表 2.3 GPS の電波と信号

搬送波	L1 波 1,575.42MHz	L2 波 1,227.6MHz
変調信号	C/A コード: 公開 P(Y)コード: 非公開	P(Y)コード: 非公開
情報データ	航法メッセージ	

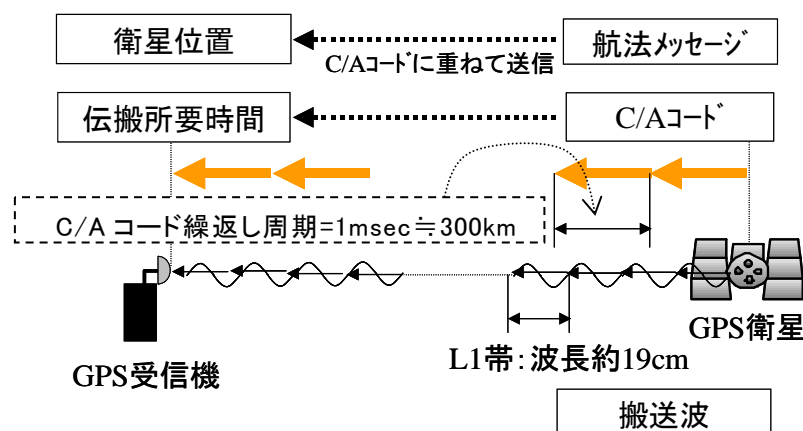


図 2.4 GPS の電波と信号の関係

2.1.5 GPS 衛星から送られてくる情報

航法メッセージは GPS 受信機で衛星位置を計算するためのデータ等を含んでいる。ビット率 50bps, 全ビット数 1,500 ビットを主フレームとするデータであり, 25 個の主フレームでマスターフレームを構成している。マスターフレームは繰り返し送信されていて, 航法メッセージを全て読むにはマスターフレームが一巡する 12.5 分の受信時間が必要である。

航法メッセージに含まれる主な内容は次の通りである。

(1) 軌道情報

任意の時刻における GPS 衛星の位置を利用者が計算するための情報であり, ケプラーの軌道要素のパラメータで構成される。各衛星の軌道は地上の追跡局によって常時モニタリングされていて, 軌道情報は定期的に更新されて衛星から送信されている。衛星毎の詳細な軌道情報をエフェメリス(ephemeris), 全衛星の概略の軌道情報をアルマナック(almanac)と呼ぶ。

(2) 衛星時計補正パラメータ

衛星時計はルビジウムやセシウムという原子時計であり極めて安定度が高いが, ドリフトなどの若干の誤差を持つ。地上の追跡局では全ての衛星の軌道と時計を監視しており, 衛星時計の誤差を補正するデータを生成している。この補正データが衛星から航法メッセージとして送信され, 受信機では補正データを用いて衛星時計の時刻を補正している。衛星時計補正パラメータは航法メッセージの中では 30 秒ごとに繰り返し放送されている。

(3) 電離層補正データ

衛星からの電波が電離層を通過する際の遅延量を推定するモデルを用いて計算された補正データが放送されており, 受信機で遅延量を補正する。

(4) GPS 時

衛星上の原子時計が刻む時刻を GPS 時(GPS time)という。1980 年 1 月 6 日 0 時 UTC (Universal Time Coordinate: 協定世界時)を同じ日の 0 時 GPS 時としてスタートしている。GPS 時は UTC で行う閏秒の挿入を行わないため年によって整数秒の差が生じる。

航法メッセージでは GPS 週番号と GPS 時で時刻を放送している。GPS 週番号は 1980 年 1 月 6 日の週を第 0 週として開始した週番号である。一方, GPS 時は週初めからの経過時間で表される。航法メッセージでは GPS 週番号と GPS 時で時刻を放送している。GPS 週番号は 1980 年 1 月 6 日の週を第 0 週として開始した週番号である。

GPS 週番号は, 週番号のカウンタが 10bit であったため, $2^{10}=1024$ しかカウントできず, 第 1023 週の次の週は第 0 週に戻ってしまう。これを GPS 週番号繰り返し(GPS Week Number Rollover)問題と呼び, 1999 年 8 月 21 日(第 1023 週の終わり)から 8 月 22 日(第 0 週のはじまり)にかけて発生した。

2.2 代表的な GPS 測位の原理(1)―単独測位法

2.2.1 単独測位の概要

単独測位とは、1 台の GPS 受信機を用いて複数の衛星からの電波を受信することにより観測点の位置を求める基本的な測位方式で、精度は 10m 程度である。GPS 受信機から位置が既知である複数の衛星までの距離を計測して、衛星位置を中心として観測距離を半径とする複数の球面の交点として観測点の位置を求める方法である(原理的には 3 個の衛星からの観測距離を半径とする球面は 1 点で交わる)。単独測位の概略の仕組みを以下に示す。

まず、GPS 衛星の任意の時刻における位置は、航法メッセージに含まれる衛星軌道情報を用いて受信機内で即座に計算される。

次に、受信機から衛星までの距離は衛星からの受信機までの電波の伝搬時間を観測し、それに電波速度を乗じて求める。衛星からは L1 波に乗せて図 2.5 のような C/A コードと呼ばれる信号が送られている。この信号は衛星毎に異なるコードパターンを持ち、1ms 毎に同じパターンを繰り返している。一方、GPS 受信機では受信しようとする衛星のコードパターンでコードを 1ms 毎に発生させている(レプリカという)。受信機に入ってきた衛星のコードと受信機内で生成したコードを比較することにより、受信した衛星のコードの遅れを検出する。この遅れの時間が衛星電波の伝搬時間となる。

ここで問題となるのは衛星と受信機でのコード発生タイミングの精度である。衛星電波のコード発信のタイミングと受信機でのコード生成のタイミングが精確に合っていれば観測された伝搬時間に誤差は含まれない。GPS 衛星の電波発射のタイミングは安定度の非常に高い原子時計によって制御されている。したがって、もし受信機にも同様に高精度な原子時計を用いれば観測される伝搬時間に誤差は生じないと考えられる。しかし、受信機に原子時計を搭載することは困難であり、実際の受信機では安定度の劣る水晶時計を用いている。水晶時計に基づくコード生成時刻は精確でないため、伝搬時間に無視できない誤差が含まれることになり、伝搬時間に光速度を乗じて求める観測距離にも大きな誤差が含まれてしまう。この観測距離のことを元来誤差が含まれた概略値であるという意味で擬似距離(Pseudo Range)という。

もし観測距離に誤差がなければ 3 個の衛星の位置とそれらの衛星から受信機までの観測距離を用いて受信機の位置は確定するが、観測距離(擬似距離)は大きな誤差を含むため、受信機時計を基準とした 3 個の衛星からの距離計測では精確な位置が求まらない(図 2.6)。

この受信機の時計誤差を削除するために次のような方法が採られている。

すなわち、全ての衛星時計は正確に同期しているので、受信機時計の誤差は全ての衛星時計に対して同じ値となり、これに起因する距離誤差も各衛星に対して同じである。このため、時計誤差を未知数として扱い、受信機の 3 次元位置 (x, y, z) の未知数と合わせて 4 個の未知数を最低 4 個の衛星からの観測距離(真の距離+時計誤差による距離)を基に立てられた連立方程式によって求めている。すなわち、4 個以上の衛星から電波を受信すれば受信機の位

置と受信機時計誤差を求めることができる。

なお, GPS 衛星に搭載されている原子時計の公称安定度は 10^{-13} 程度である。航法メッセージの更新による衛星時計の補正は2時間毎に行われるから, 更新直前には, $10^{-13} \times 7200(\text{s}) = 7.2 \times 10^{-10}(\text{s})$ の誤差が発生する可能性がある³⁾。この誤差を電波の進む距離に換算すると約20cm にすぎないため, 単独測位では問題にならない(ただし, 干渉測位では大きな誤差要因であるため除去する必要がある)。

一方, GPS 受信機に搭載されている水晶時計の公称安定度は 10^{-6} 程度である。単独測位は通常1秒毎に測位するので測位直前には $1 \times 10^{-6}(\text{s})$ の誤差が発生する可能性があり, 電波の進む距離に換算すると約300m になる。

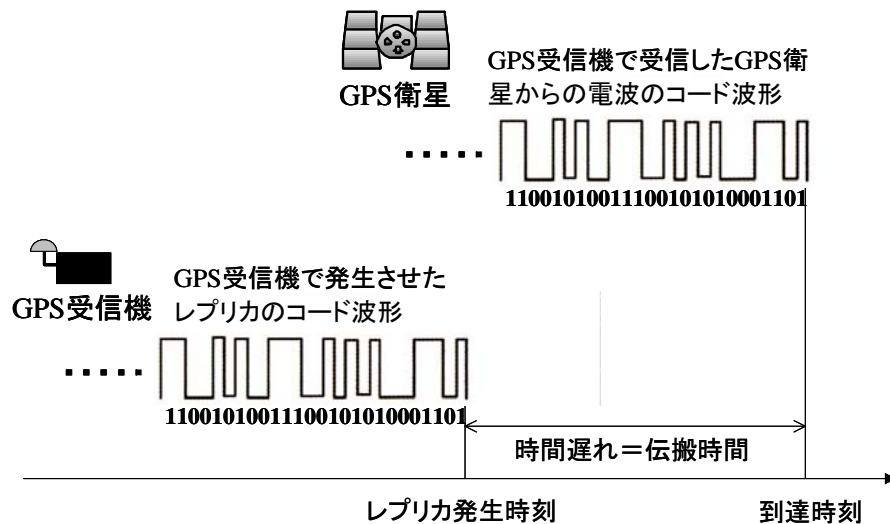


図 2.5 C/A コードによる伝搬時間測定⁴⁾

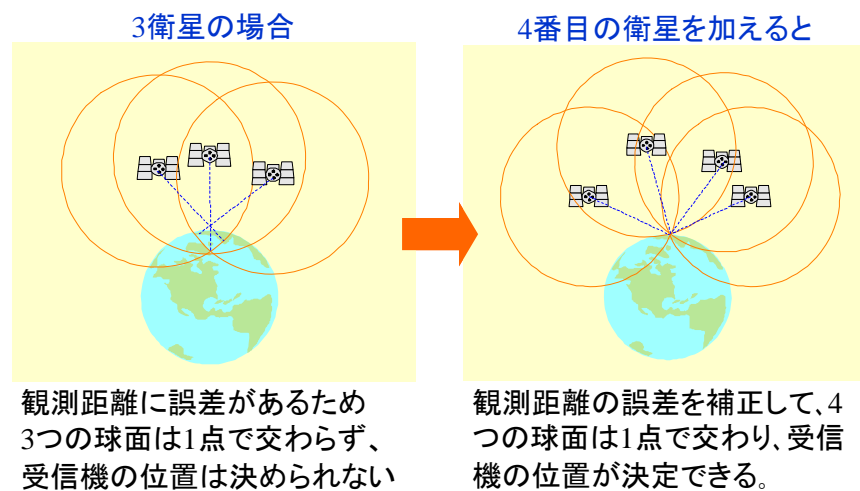


図 2.6 観測距離の補正と受信機位置の決定⁴⁾

2.2.2 測位計算方法

図 2.7 に示すように衛星 i の3次元座標を (X_i, Y_i, Z_i) , 受信機の3次元座標を (x, y, z) とする。なお, GPS で用いる座標系は地球重心を原点とする WGS84(World Geodetic System 1984)と

呼ばれる3次元直交座標系である。地球の自転軸方向を Z 軸, グリニジ基準子午線と赤道が交わる方向を X 軸, これらと右手系をなすように Y 軸をとる。受信機と各衛星との擬似距離を r_i , 真の距離を ρ_i , 光速を c , 受信機時計の誤差(進み)を δ_R とすると次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} r_i &= \rho_i + c\delta_R \\ &= \sqrt{(x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2} + s \end{aligned} \quad (2.1)$$

ただし, $s = c\delta_R$

であり, 各衛星への観測距離に関して共通である。測位を行うためには式(2.1)を解けばよい。式(2.1)には未知数が受信機の位置 x, y, z と受信機時計誤差 δ_R による測距誤差 s の4個の未知数が含まれているため, 4個以上の関係式を与えなければ解けない。したがって, 最低でも4個の衛星からの信号を受信しなければならない。受信衛星数が4個の場合は, 測位解は一義的に決定されるが, 5個以上の場合は最小二乗法により最確値として測位解が求まる。

また, 式(2.1)は未知数に対して線形でないのでこのままでは解くことができない。そこで, 未知数を近似値と補正值の和で表し補正值について展開し, 二次以上の項を無視して線形化する²⁾。その結果得られる連立一次方程式を解いて補正值を求め, その補正值を近似値に加えることによって新たな近似値を設定して再度計算を行い, 必要な精度に収束するまで繰り返すという方法がとられる。通常, 最初の推定座標値が真の位置から100km程度以内にあれば, 5回程度の逐次計算で単独測位の精度内に収束する。

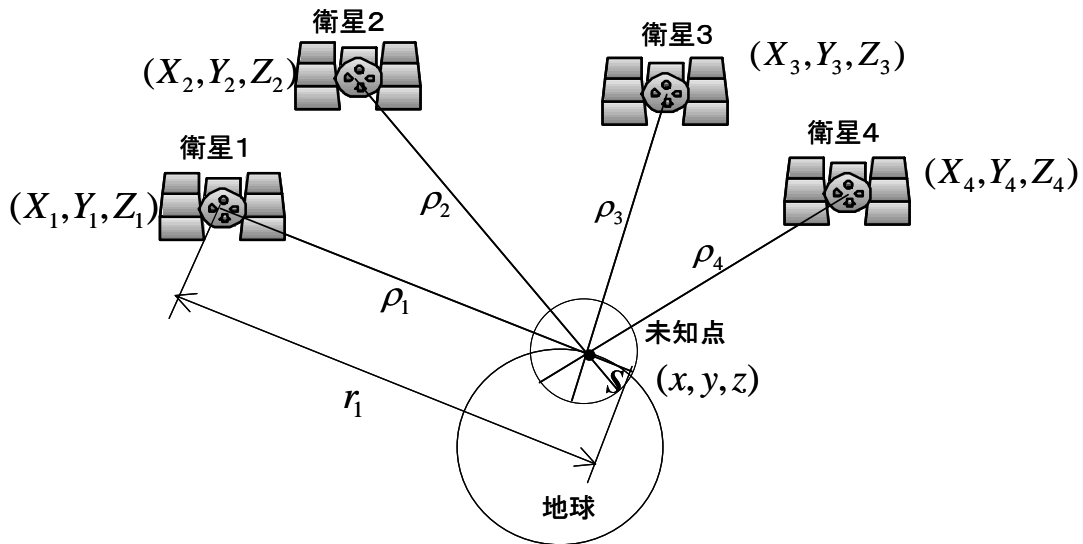


図 2.7 単独測位の原理⁴⁾

2.2.3 GPS 測位の誤差と補正方法

(1) GPS 測位の誤差要因

GPS による単独測位では図 2.8 及び表 2.4 に示すように衛星, 伝搬経路, 受信機に関する誤差を含む。以前は米国の安全保障のために意図的に衛星時計のタイミングをずらす操作

(SA:Selective Availability:選択利用性と呼ばれる)が、民間利用の単独測位の場合には精度を30～100mに劣化させていた。これが最も大きな誤差要因を占めていたが、2000年5月2日に解除されている。

a. 衛星に関する誤差要因

①衛星時計の誤差

SAが発動されていた時期には意図的な誤差が含まれていたが、現在ではSAは解除され衛星時計の誤差は小さい。衛星時計誤差は時計のわずかな揺れ(ドリフト)に起因するが、航法メッセージに含まれる補正係数を用いて大部分が消去される。

②衛星位置の誤差

衛星軌道は航法メッセージに含まれるエフェメリスの16個の軌道係数で記述され、受信機ではこの係数により衛星位置を計算する。エフェメリスは地上の追跡局の観測データに基づいて定期的に更新されるが、衛星軌道は太陽や月の引力、太陽光の輻射圧などの外力により揺れが生じるため、エフェメリス更新までに誤差が発生する。

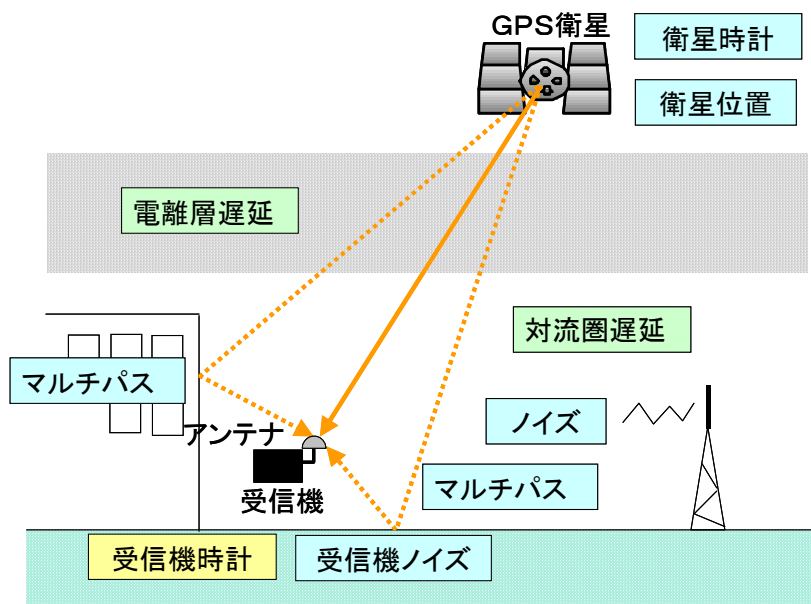


図 2.8 GPS 測位の誤差要因⁴⁾

表 2.4 GPS 測位の主な誤差要因⁵⁾

誤差要因		測距誤差(rms:root mean square)
衛星関連	衛星時計	～2m
	衛星位置(軌道情報)	～2m
伝搬関連	電離層遅延	2～10m
	対流圏遅延	2～3m
受信機関連	マルチパス	1～5m
	受信機雑音	0.25～0.5m

b. 電波の伝搬経路に関する誤差要因

①電波の電離層遅延

電離層とは地上 60km から 1,000km の高度にある非常に希薄な大気が太陽からの紫外線、X 線によって電離した状態になっている層をいう。信号(コード)が電離層を通過する際には遅延が生じるが、遅延量は伝搬経路の総電子数に比例し、天頂方向で 2m~10m 程度の値となる。電離層状態は太陽活動に大きく影響されるため、信号の遅延量は季節、時刻(昼、夜)にも依存する⁵⁾。航法メッセージに含まれる補正係数を用いて測距誤差に換算して 5m(rms)以下のレベルに補正できる。なお、電離層ではコードは遅延するが、搬送波は逆にコードの遅延量と同じ量だけ早く進むことに注意しなければならない。

②電波の対流圏遅延

対流圏にある大気中を電波が通過する際には、乾燥空気と水蒸気が伝搬速度に影響を与え、遅延が生じる。天頂方向の衛星に対しては 2m~3m 程度である。なお、対流圏では搬送波もコードと同様に遅延する。

c. 受信機に関する誤差要因

①電波のマルチパス

衛星から送信された電波が2つ以上の経路を通過して受信機(アンテナ)に到達する現象をマルチパスという。受信機周辺の建物や地表からの反射波を受信してしまうことから発生する。

②受信機雑音

単独測位用受信機では測距誤差に換算して 0.25m~0.5m(rms)のレベルである。なお、受信機時計の誤差は単独測位の計算過程で消去される。

以上が主な誤差要因であるが、GPS 測位に関するこれらの誤差は時々刻々変化しており、高精度な測位を維持するためにはこれらの誤差の補正を正確に行う必要がある。

(2) 衛星配置が測位精度に及ぼす影響

前項で示した誤差要因に加えて GPS の測位精度に影響を及ぼす要因として衛星の幾何的配置がある。これは地上測量における基準点網の形状が精度に及ぼす影響と同じ関係である。測位に使う 4 衛星が天空においてほとんど同じ場所に集まってしまったような場合には精度が著しく劣化する。

測位計算に使用する 4 個の衛星の幾何学的配置が測位精度に及ぼす影響を示す指標は、精度低下率 DOP(Dilution of Precision)と呼ばれる。受信機から衛星までの擬似距離測定の誤差が、測位結果に何倍になって表れるかを示す指標であり、GPS 測定が行えるのは、DOP が 10 以下程度までの範囲である。指標である DOP に単位はない。したがって、DOP を使用するときには各衛星への擬似距離の誤差 σ_0 が同一であると仮定する。この σ_0 を利用者等価測距誤差 UERE(User Equivalent Range Error)という。

DOP は観測点から 4 個の衛星を見た場合の方向余弦を用いて定義される。DOP には幾つ

か種類があり、幾何学的精度劣化率 GDOP (geometrical), 位置精度劣化率 PDOP (position), 水平精度劣化率 HDOP (horizontal), 垂直精度劣化率 VDOP (vertical) などである。3次元位置精度(rms)は $\sigma_0 \cdot \text{PDOP}$ で与えられる。水平位置精度, 垂直位置精度はそれぞれ $\sigma_0 \cdot \text{HDOP}$, $\sigma_0 \cdot \text{VDOP}$ で計算される。

衛星の幾何学的配置が良くなるほど DOP の値は低下する。一般には PDOP を使用する場合が多い。米国政府が保証する民生用単独測位の精度は PDOP の値が 6 以下という条件がついている。配置条件がよい場合には PDOP は 2 前後の値をとる。

(3) 相対測位

単独測位では先に説明した誤差要因を除去することは難しく、より高精度の測位結果を得ようとする場合には相対測位が用いられる。相対測位の場合、2 台以上の GPS 受信機が必要である。1 台の GPS 受信機は位置が正確に分かっている既知点上に設置し、他の 1 台は測定する点上に設置する。この 2 台が地上で数十 km の範囲内にあれば、衛星からの電波の電離層遅延や対流圏遅延は両地点でほぼ同じと見なされる。したがって、両方の受信機で同時に観測することにより電離層遅延、対流圏遅延という伝搬経路に関する誤差はほぼ相殺することができる。軌道誤差についても同様に相殺される。衛星関連、伝搬関連の誤差は低減されるが、受信機関連の誤差は消去できない。

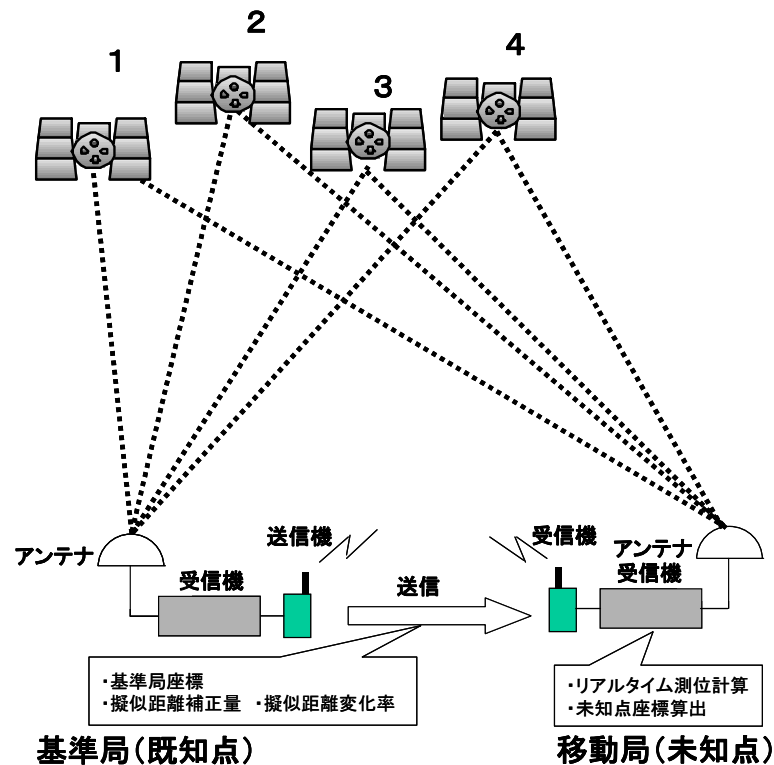
相対測位にはコードを用いたディファレンシャル測位(Differential GPS: DGPS)と呼ばれる方式と、電波の搬送波を用いる干渉測位と呼ばれる方式とがある。干渉測位方式では衛星時計の誤差と受信機時計の誤差をともに消去して cm 単位での精度を得ることができる。基準点測量はじめ建設分野で使用されている GPS 測位のほとんどは干渉測位方式である。干渉測位に関しては次節で記す。

(4) ディファレンシャル測位

予めその位置座標が正確に測定された基準点において、単独測位によって測位した結果との差は、電離層遅延、対流圏遅延の影響による誤差と考えられる。基準点では、真値と単独測位での測定値との差を算出することができるので、これを補正值として測定点に送信することによって、測定点での GPS 単独測位値から共通誤差を取り除くことができる。このように単独測位値を用いながら、測位精度を向上させることができる測位方式となる。補正情報を無線等で送信することによりリアルタイムな測位が可能である。

ディファレンシャル測位における補正值の送信は、座標差そのものを補正值として送り移動局で単純に観測座標値から補正值を差し引く方式と、各衛星からの距離観測値(擬似距離)の補正值を送って移動局で再計算する方式とがある。現在ディファレンシャル方式として実際に行われているのは後者の方式である(図 2.9)。

ディファレンシャル方式の測位精度は 0.5m~2m 程度とされ、船舶・車両等のナビゲーションに利用されている。

図 2.9 ディファレンシャル測位⁴⁾

2.3 代表的な GPS 測位の原理(2)―干渉測位法

GPS による測位方式のうち、測量や地殻変動観測、施工機械のモニタリングや制御に用いられるのは干渉測位方式である。この干渉測位方式の原理と応用について記す。

2.3.1 干渉測位の概要

干渉測位という言葉の由来は、電波星を観測して長基線を計測する VLBI (Very Long Baseline Interferometry: 長基線電波干渉法) に類似しているからといわれている。以下に、干渉測位の概略の仕組みを説明する。

(1) 搬送波位相の測定

干渉測位はディファレンシャル測位と同じく相対測位であるが、大きく異なるのは、干渉測位では衛星からの搬送波の波の数(波数)を測る点である。搬送波はサイン波形を有し、位相角を度やラジアンによって表すが、GPS 干渉測位では位相角を波数で表し、単位としてサイクルを用いる。度、ラジアンと波数の単位であるサイクルは次頁の図 2.10 のように対応している。干渉測位用受信機は次の機能と特徴を有している。

① 搬送波位相の検出機能

干渉測位用受信機は搬送波波長の 100 分の 1 で位相角を検出できる。L1 波の波長は約 19cm であるので、距離にして約 2mm の分解能を持つ。ただし、検出できるのは、図 2.10 というと 0 から 2π までの位相角、すなわち、波数の小数部の値である。

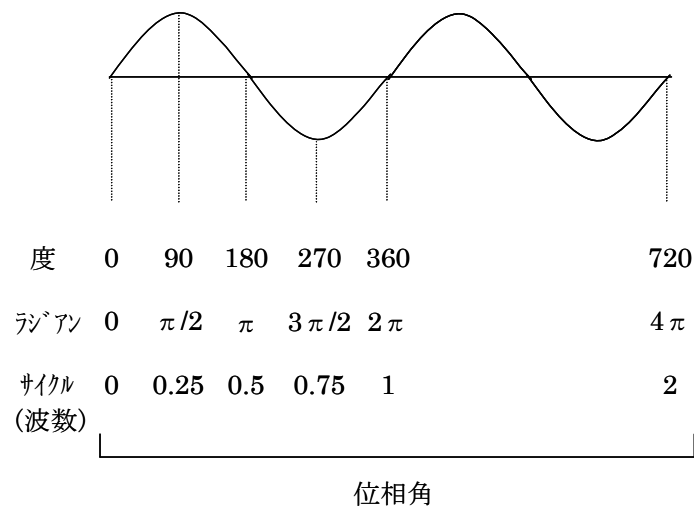


図 2.10 搬送波位相の表し方

② 位相(波数)の積算機能

測定開始時から任意の時刻までの衛星と受信機間の波数の変化分を積算することができる。一旦測定が始まれば小数部分での繰り上がりや繰り下がり数を数えることで、整数部でどれだけ波数が変化したかを知ることができる。その積算の概略の仕組みは次のとおりである。地球上の受信機と衛星との距離は時々刻々絶えず変化している。したがって、地上の受信機ではドップラー効果を受けて周波数が変化した搬送波を受信している。この周波数が変化した搬送波からドップラー信号のみを取り出し、このドップラー信号の位相をある一定時間積分することによって、受信機と衛星間の波数の変化量を知ることができる⁶⁾。

③ 位相積算値の誤差

干渉測位用受信機では衛星からの搬送波を再生して受信機時計のタイミングに合わせて位相角を測定している。したがって、観測した位相角には受信機時計の誤差が含まれている。また、搬送波到達のタイミングには衛星時計の誤差が含まれている。誤差の大きさは数 ns (10^{-9} s)であり、電波の速度で換算すると 1m 前後の誤差に相当する。比較的低精度で用いられる単独測位では衛星時計は全て合っていると仮定し誤差を無視したが、高精度を要求される干渉測位では誤差として扱うことになる。

(2) 距離測定と整数値バイアス

衛星から受信機までの距離は波数に波長を乗じて求める。受信機が最初に波を受信したとき、それが連続波のどの部分であるか波数の小数部は分かるが、衛星から受信機までの波のうち波数小数部を除いた整数部の波数は不明である。すなわち、最初の受信時($t=0$)では

$$\text{観測距離} = (\text{波数の整数部分} + \text{波数の小数部}) \times \text{波長}$$

であり、続けて受信すると、波数の変化分は測定できるので時刻 $t=t_1$ では、図 2.11 のように、

$$\text{観測距離} = (\text{最初の波数の整数部分} + \text{波数変化分}) \times \text{波長}$$

となる。波数の変化分は受信機で観測される位相積算値であり、衛星が受信機から遠ざかる

時は位相積算値は増加し、近づく時は積算値は減少する。また、時間経過後も最初の波数の整数部分は未知のままで同じ値であり、これを整数値バイアスという。観測距離から時計誤差による距離誤差を引けば真の距離が求められる。すなわち、

真の距離 = (整数値バイアス + 波数積算値) × 波長 - 受信機時計誤差 × 光速度 - 衛星時計誤差 × 光速度

となる。

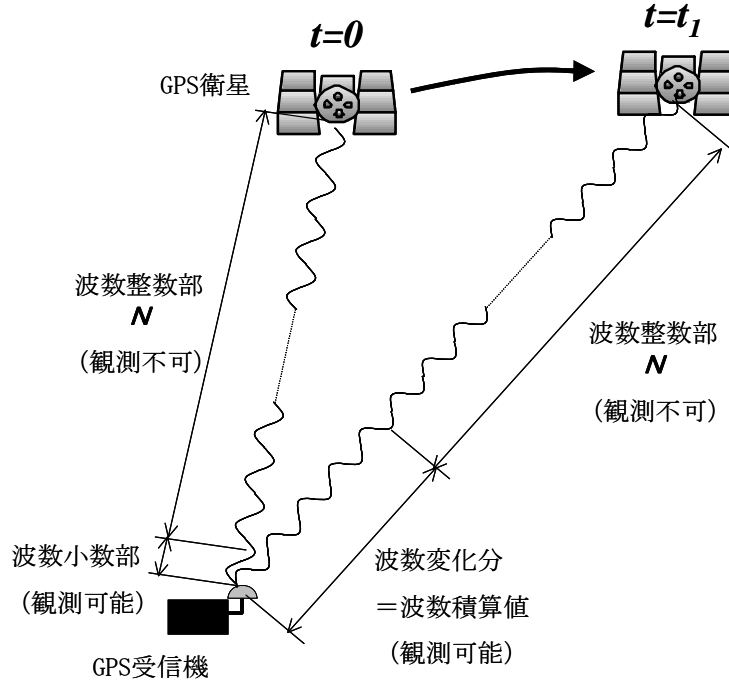


図 2.11 干渉測位用受信機による波数測定 ⁷⁾

(3) 差分観測による時計誤差の消去

干渉測位では受信機時計誤差、衛星時計誤差を消去するために、距離の差分をとる操作を行う。そのために受信機2台、衛星2個の組合せを基本に考える。既知点に設置した受信機Aの座標を (X_A, Y_A, Z_A) 、未知点の設置した受信機Bの座標を (X_B, Y_B, Z_B) として受信機Bの座標を求めることを考える。

いま、時刻 $t = t_1$ における衛星 i 、受信機 j 間の真の距離 $\rho(i; j)$ は、整数値バイアス $N(i; j)$ 、波数積算値 $\Phi(i; j)$ 、波長 λ 、受信機時計誤差 δ_R 、衛星時計誤差 δ_S 、光速度 C とすると、(2)項での議論から

$$\rho(i; j) = \{N(i; j) + \Phi(i; j)\}\lambda - c\delta_R - c\delta_S \quad (2.2)$$

となる。一方、 $\rho(i; j)$ は衛星と受信機の座標から次の式で表すことができる。

$$\rho(i; j) = \{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2\}^{1/2} \quad (2.3)$$

なお、任意の時刻における衛星1及び衛星2の座標 (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) は航法メッセージの軌道情報から計算できる。

式(2.2)から、衛星1と受信機B間の距離から衛星1と受信機A間との距離の差をとると、式

(2.4)に示すように衛星時計の誤差の項が消える。この距離の差を行路差と呼ぶ。このとき、位相積算値の差を受信機間一重位相差といい、図 2.12 に示す。

$$\rho(1; B) - \rho(1; A) = \{N(1; B) - N(1; A)\}\lambda + \{\Phi(1; B) - \Phi(1; A)\}\lambda - c(\delta_{RB} - \delta_{RA}) \quad (2.4)$$

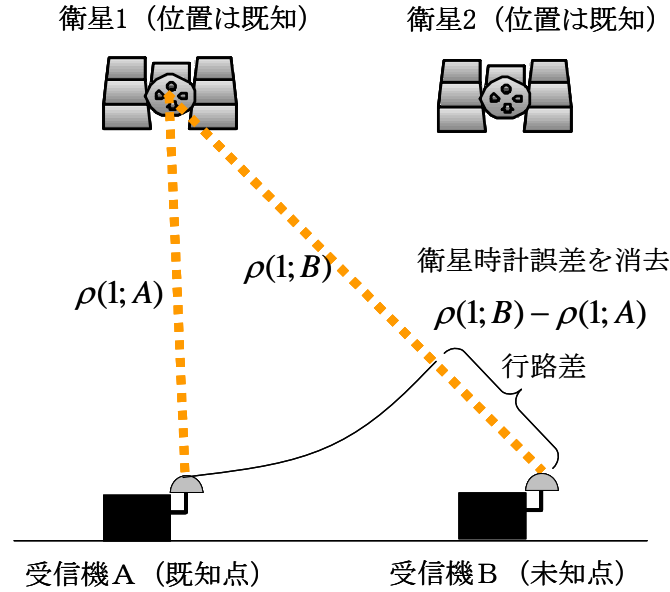


図 2.12 行路差と受信機間一重位相差 ⁷⁾

同様に衛星 2 から受信機 B 及び受信機 A までの距離の差をとり、それを式(2.4)から引くと受信機時計の誤差の項が消える。この位相積算値の差を二重位相差といい、図 2.13 に示す。

$$\begin{aligned} & \rho(2; B) - \rho(2; A) - \rho(1; B) + \rho(1; A) \\ &= \{N(2; B) - N(2; A) + N(1; B) - N(1; A)\}\lambda \\ &+ \{\Phi(2; B) - \Phi(2; A) - \Phi(1; B) + \Phi(1; A)\}\lambda \end{aligned} \quad (2.5)$$

式(2.5)は 2 つの行路差の差であり、受信機時計と衛星時計の誤差の項を消去した式となる。

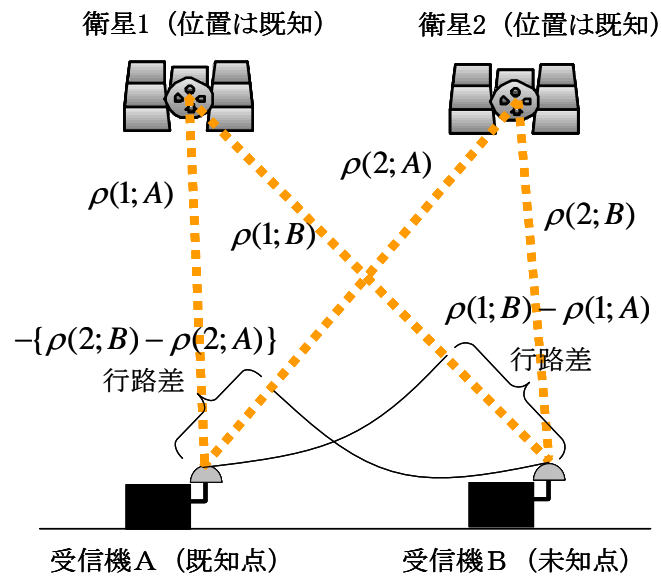
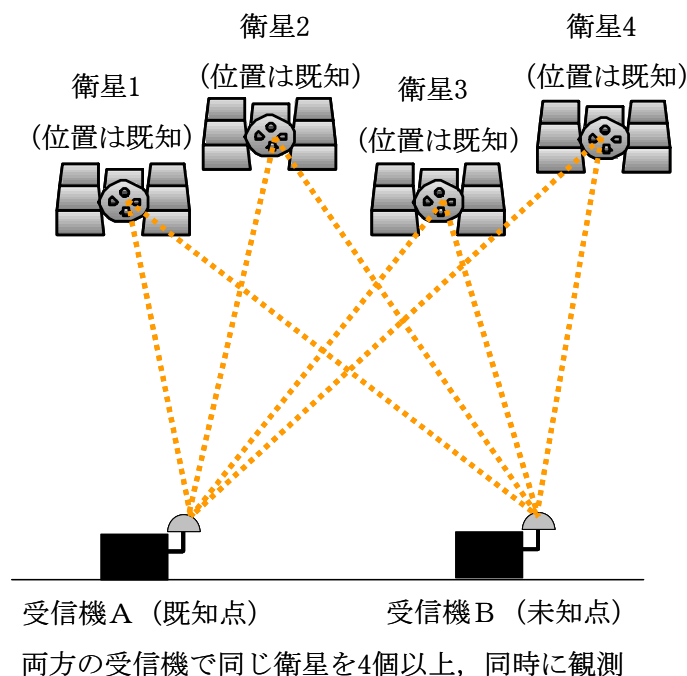


図 2.13 行路差の差と二重位相差 ⁷⁾

(4) 二重位相差による未知点座標の計算

式(2.5)をみると左辺は $\rho(1;A)$, $\rho(2;A)$ は既知であり、受信機Aは既知点であるので、未知数は、 $\rho(2;B) - \rho(1;B)$ の項に含まれる受信機 B の3次元座標 X_2, Y_2, Z_2 の3個となる。一方、右辺は整数値バイアスの項と位相積算値の項である。整数値バイアスの項は別途計算すると、位相積算値の項は観測値であり既知である。したがって、式(2.5)には3個の未知数が含まれている。3個の未知数を解くためには、式(2.5)で示される二重位相差の方程式を3個以上つくる必要がある。観測する衛星数を n とすると線形独立な二重位相差の式は $n-1$ 個となる。よって、3個の未知数を解くためには図 2.14 で示すように4個以上の衛星から電波を受信する必要がある。これは単独測位で必要とする衛星数と一致する。未知点座標の計算は複数の時刻での観測値から二重位相差を計算し最小二乗法で求める。二重位相差を求めるには両方の受信機で同時に同じ衛星を観測していることが必要である。

図 2.14 未知点座標の測定方法⁷⁾

(5) 整数値バイアスの推定と解の検証

整数値バイアスの値(N)は全くの未知というわけではなく、DGPS による観測距離からある程度絞り込まれる。DGPS による観測距離は、通常の観測環境においては精度 0.5m 程度で求めることができる。L1 波の1波長は約 0.19m であるから、DGPS の観測距離から求まる整数値バイアスの候補は、実際の N に対して例えば $0.5/0.19 \div \pm 3$ の範囲に絞り込まれる。その組合せ毎に式(2.5)を最小二乗法によって計算し、残差が最小となる組合せをバイアスの組合せとして決定する。その際、推定したバイアス値に対して統計的な検証を行う。検証結果が良好であればバイアスは整数値として確定するが、良好でなければバイアスは実数値となる。

整数値バイアスの組合せが確定すれば、式(2.5)から受信機 B の3次元座標が計算される。バイアス値が整数値として確定した場合の解を厳密解(フィックス解)と呼び、バイアス値が実数値のままの場合の解を非厳密解(フロート解)と呼ぶ。フロート解となるのは観測時間が短い(観測データセットが少ない)場合や衛星電波の受信が頻繁に中断した場合など、観測条件が十分でなかったことに起因する。フィックス解の精度は 5mm~20mm 程度であるが、フロート解の精度は十 cm~数 m になる。

2.3.2 行路差と基線ベクトル

干渉測位の原理は行路差と基線ベクトルとの関係からも説明できる。受信機 A から受信機 B への基線ベクトルを \mathbf{D} 、受信機 A から衛星方向への単位ベクトルを \mathbf{i} とすると行路差 PD(Path Difference)は、

$$PD = \mathbf{D} \cdot \mathbf{i} + 0(\mathbf{D} \cdot \mathbf{i}) \quad (2.6)$$

で表される(図 2.15)。 $0(\mathbf{D} \cdot \mathbf{i})$ は衛星までの距離が有限であるために受信機 A からの衛星方向と受信機 B からの衛星方向がわずかに異なるための補正項であり、基線距離が短い場合はほとんど 0 に近い⁸⁾。

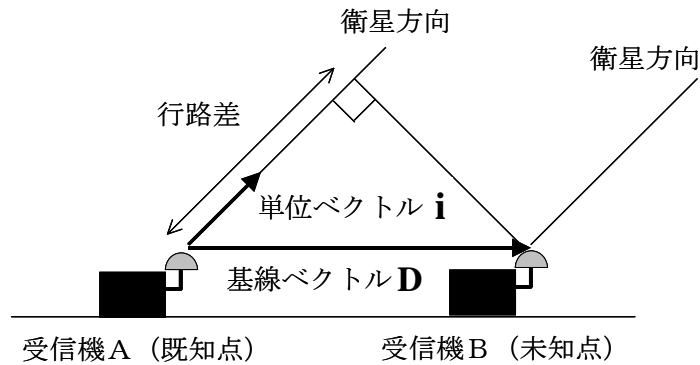


図 2.15 行路差と基線ベクトル⁷⁾

基線ベクトル \mathbf{D} は、

$$\mathbf{D} = (X_B - X_A, Y_B - Y_A, Z_B - Z_A) \quad (2.7)$$

であり、単位ベクトル \mathbf{i} は受信機 A から衛星方向への方向余弦の 3 成分をベクトル成分とするものである。衛星への単位ベクトルを

$$\mathbf{i} = (\cos \alpha_i, \cos \beta_i, \cos \gamma_i) \quad (2.8)$$

とすると、

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{i} = (X_B - X_A) \cos \alpha_i + (Y_B - Y_A) \cos \beta_i + (Z_B - Z_A) \cos \gamma_i \quad (2.9)$$

である。

一方、行路差 PD は観測量であり、式(2.6)から基線ベクトル \mathbf{D} の 3 成分を求めるには独立な

3 個の PD があればよい。すなわち、3 個の衛星観測で良いと考えられる。

しかし、衛星 i に対する PD は、 $PD = \rho(i; A) - \rho(i; B)$ であるので、式(2.4)から整数値バイアスの項と波数積算値の項及び受信機時計誤差の項で表されることがわかる。観測量の中に受信機時計誤差が含まれているため、行路差同士の差分をとって受信機時計誤差を消去しなければならない。そのために4番目の衛星観測が必要となる。したがって、式(2.6)による基線ベクトルの計算の場合も4衛星以上が必要となる。

2.3.3 干渉測位の種類と特徴

干渉測位には測位形態や整数値バイアス推定法に応じて次に示す3つの種類がある。

(1) スタティック測位

3次元座標が既知の点と未知の点に受信機を固定して衛星電波の受信と記録を行い、既知点と未知点で同時に取得した位相積算値データを用いて後処理で測位計算を行う方式である。通常は30秒あるいは15秒毎に位相積算値を記録して観測終了後に既知点、未知点の観測データをパソコンに転送して、データ取得時毎に観測衛星の3次元座標計算と二重位相差の計算を行う。そして、式(2.6)から最小二乗法により測位計算を行い未知点の座標を計算する。受信機でのデータ取得時をエポックと呼び、データ取得間隔をエポック間隔という。

整数値バイアスの推定は、衛星の移動を利用して行う。図 2.16 に示すように整数値バイアスの組み合わせ毎の未知点座標の候補は、L1 波長 19cm 毎の立体格子点でイメージされる。真の未知点座標は、衛星が移動しても動かない(不動点)という性質を使って、整数値バイアス組合せと未知点座標の決定を行う。この方式では衛星が十分移動する必要がある、通常 60 分程度の衛星観測をとる。長時間の観測データが平均化されるため、測位精度は最も高い。基線計測精度は L1 波、L2 波を受信する 2 周波受信機の場合、 $5\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$ (D は基線長)である。なお、観測衛星数が 5 個以上の場合、観測時間を 20 分程度として行う高速(短縮)スタティック方式もある。

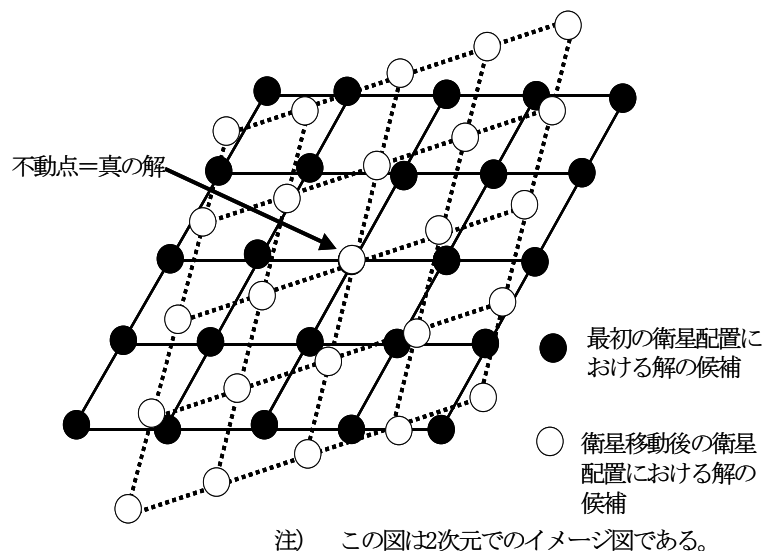


図 2.16 整数値バイアスの探索

(2) キネマティック測位

既知点に受信機を固定し、測定者の受信機は移動局として移動しながら順次波数積算値データを取得し、後処理で固定局(基準局ともいう)と移動局のデータを用いて測位計算を行う方式である。基線計測精度は L1 波, L2 波を受信する 2 周波受信機の場合, $20\text{mm}+2\text{ppm}\cdot D$ とされる。整数値バイアスの推定はスタティック測位のように長時間の観測を要する衛星の移動を利用する方法はとれないため、一般的に移動局が既知点から出発する方法が採られる。この方法は、式(2.4)において二重位相差の項は観測データから計算され、距離の項は衛星の位置、受信機の位置が既知であることから計算できる。よって、整数値バイアスの項は式(2.6)から値が決定できるので、以降は整数値バイアスの組み合わせの値を固定して処理すればよい。

ただし、障害物等により一旦衛星からの電波が遮断されると整数値バイアスの連続性が失われ、サイクルスリップと呼ばれる整数倍のシフトが起こる。その場合は、再び既知点に受信機を設置して整数値バイアスを推定、決定しなければならない。

(3) リアルタイムキネマティック測位

RTK-GPS(Real Time Kinematic GPS)と呼ばれる実時間でキネマティック測位を行う方式で、本論文で検討する『情報化施工』のほとんどの要素システムは本方式を利用したものである。

固定局はその観測した位相積算値データを通信システムを介して移動局へ伝送する。移動局ではそのデータを利用し、リアルタイムに移動局の測位計算を行い結果を出力する。

基線計測精度は L1 波, L2 波を受信する 2 周波受信機の場合, $20\text{mm}+2\text{ppm}\cdot D$ である。RTK-GPS の開発当初は、整数値バイアスの決定(初期化)は既知点に静止して行う必要があったが、オンザフライ法という技術が開発されてからは移動しながら初期化することが可能になった。ただし、オンザフライ法を行うには L1 波, L2 波を受信する 2 周波受信機が必要である。

干渉測位の各種方式のまとめを表 2.5 に示す。

表 2.5 干渉測位の各種方式

方式 項目	スタティック測位	キネマティック測位	リアルタイムキネマティック測位
観測時間	20 分～数時間	1 秒(標準)	1 秒(標準)
処理方式	観測データ取得後 オフライン処理	観測データ取得後 オフライン処理	実時間処理
受信機種別	1 周波受信機 2 周波受信機	1 周波受信機 2 周波受信機	2 周波受信機
基線計測精度	$5\text{mm}+1\text{ppm}\cdot D$	$20\text{mm}+2\text{ppm}\cdot D$	$20\text{mm}+2\text{ppm}\cdot D$
整数値バイアス決定 (初期化)方法	衛星移動利用	既知点法 アンテナスワップ法	既知点法 オンザフライ法

2.3.4 リアルタイム測位システム(RTK-GPS)

(1) システム構成

a. 基本構成

GPS 受信機は L1 波, L2 波の両波を受信できる 2 周波受信機を用いる。3次元座標既知点に設置する固定局受信機と計測用である移動局受信機の 2 台を基本構成とする。固定局から移動局に対して搬送波位相積算データや固定局座標データを送信する通信システムを両局に備える。移動局は固定局からのデータを受けてリアルタイムに連続して基線計算を行い, 測位結果を出力する。出力結果はハンディターミナルや携帯パソコンで表示記録される(図 2.17)。

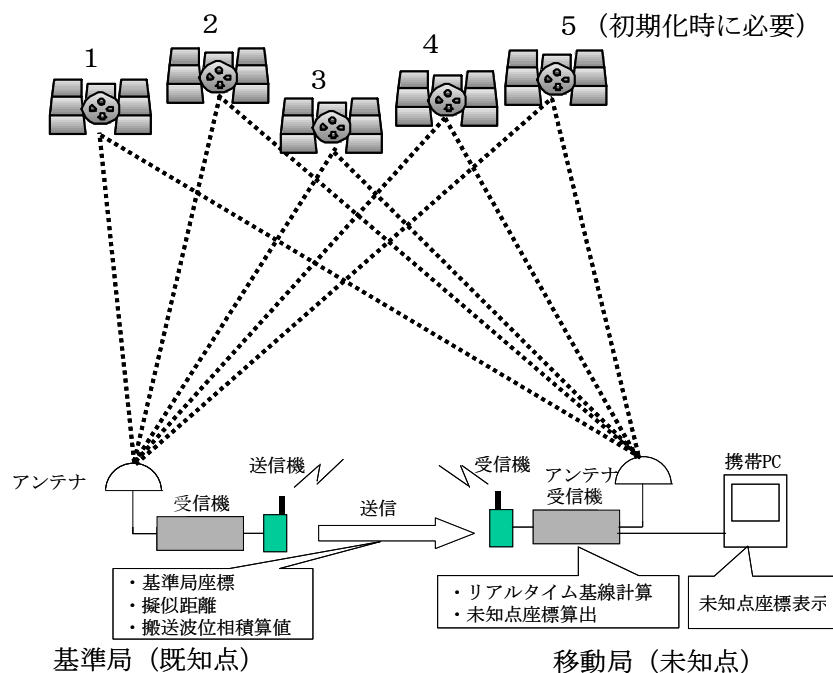


図 2.17 RTK-GPS のシステム構成 ⁷⁾

b. 通信システム

固定局から移動局まで放送する通信速度は各受信機メーカーにより異なるが, 1200～4800bps(bit per sec)以上が必要である。利用できる通信システムとしては, 特定小電力無線, SS(Spread Spectrum:スペクトラム拡散)無線, デジタル MCA(Multi-channel Access)無線, 携帯電話などがある。

c. 通信内容と伝送フォーマット

RTK-GPS で固定局から移動局へ伝送する情報は, 固定局座標と固定局で受信した全衛星に関する搬送波位相積算値及び擬似距離のデータである。伝送フォーマットには共通フォーマットと受信機メーカーが独自に作成しているフォーマットとがある。共通フォーマットとしては米国船舶電波技術委員会 RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Service)が勧告している RTCM-SC104 と呼ばれるフォーマットがある。

(2) オンザフライ法

オンザフライ(OTF : on the fly)とは、移動局のいかなる運動形態(静止, 移動)にも対応できるという意味であり、任意の場所で移動しながらでも短時間で整数値バイアスを解く方法の総称である。高速バイアス決定技術とも言われ、現在は RTK-GPS の初期化方法(整数値バイアスの推定)として一般化している。情報化施工システムで使用するリアルタイム測位法は、ほとんどが OTF 機能付きの RTK-GPS である。日本には 1994 年に導入され、雲仙普賢岳の無人化施工システムへ初めて導入された。その後の阪神大震災後の復旧工事をはじめ、多くの工事に導入されるきっかけとなった技術である。

a. OTF の意義

OTF は移動しながらでも任意の場所で初期化を極めて短時間(数秒～数分)で実行できる技法である。OTF 以前の RTK-GPS では、移動局を既知点に固定して初期化操作を行う必要があったため、例えば、RTK-GPS を実行中に捕捉衛星数が 4 個未満になると高精度な厳密解(フィックス解)が失われ非厳密解(フロート解)になってしまう度に、既知点に戻って再初期化をする必要があった。したがって障害物により衛星受信中断が頻繁に発生する環境では、操作性が甚だしく劣っていた。

しかし、OTF の実現により衛星受信中断が発生しフィックス解が失われても、任意の場所で短時間での再初期化が可能となった。また高速移動中でも初期化ができるなど、RTK-GPS の操作性は大幅に向上し適用範囲は飛躍的に増大した。したがって、OTF はいまや RTK-GPS を適用する上で必要欠くべからざる技術となっている。

b. OTF の要件

i) 初期化には 5 個以上の衛星観測が必要

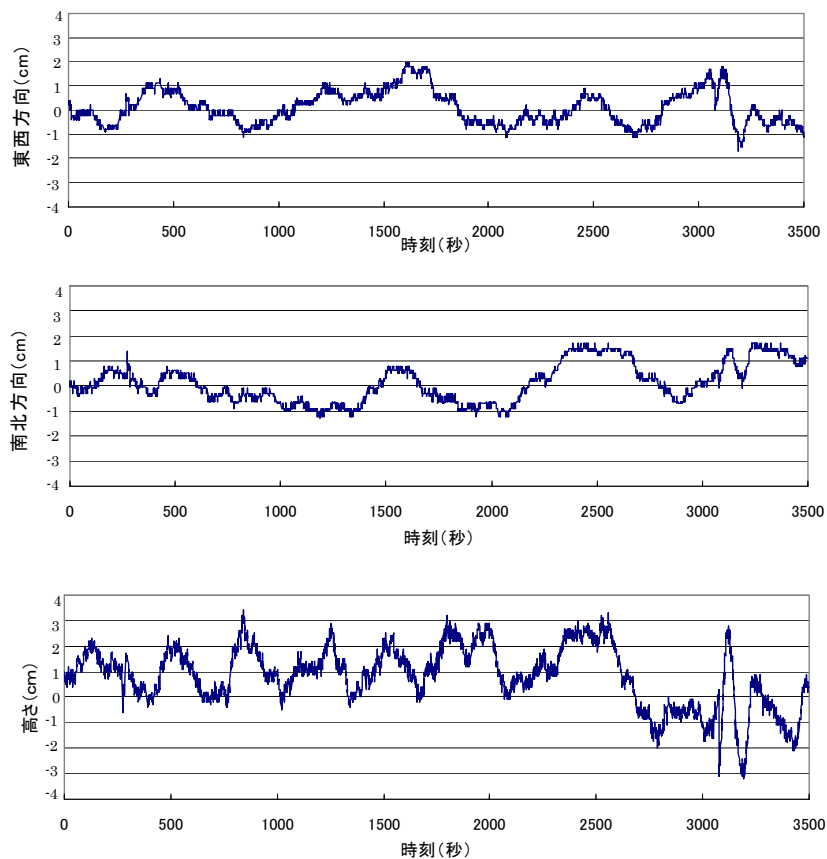
OTF では最小二乗法を用いて整数値バイアスを推定する際、スタティック測位のように長時間の衛星観測によってエポック数を多くとるわけにはいかないため、観測する衛星数を増やして処理を行う。すなわち、最低でも 5 衛星以上を観測する必要がある。これは、最小二乗法の適用に当たって未知数の数より観測方程式の数が多くなければならないという条件による。

ii) 2 周波受信機が必要

L1 波(波長約 19cm)と L2 波(波長約 24cm)の位相差をとって生成されるワイドレーン(波長約 86cm)を用いれば、整数値バイアスの探索空間を小さく絞り込み探索時間を劇的に削減できる。多くの OTF 手法ではワイドレーンを採用している。

c. RTK-GPS の特徴

整数値バイアスが確定した厳密解(フィックス解)の基線計測精度は $20\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot D$ で表わされるが、水平方向と垂直方向では精度が大きく異なる。垂直方向には水平方向に比較して 2～3 倍の誤差が発生する。図 2.18 に示すように、固定して観測していても電離層の変動やマルチパスによる影響を受けて解の値は常に変動し、その大きさは垂直方向の方が大きい。

図 2.18 RTK-GPS データのバラツキ(時間変動)⁷⁾

2.4 GPS による測量

スタティック測位による基準点測量や RTK-GPS による応用測量、各種計測、機械制御を行うにあたって基本的な事項を以下に示す。

2.4.1 観測計画

(1) 衛星観測条件の確認

干渉測位を行うためには、少なくとも 4 個以上の GPS 衛星から連続して電波を受信することが必要である。4 個以上衛星を受信できる時間帯を見つけるには、観測計画ソフトと軌道情報が必要になる。測量用 GPS 受信機の基線解析ソフトウェアには、必ず観測計画立案のためのプログラムが付属している。また、軌道情報は衛星電波を受信すると受信機のメモリに記録されるので、それを利用すればよい。観測日と場所が決まったらこのプログラムと軌道情報により、観測する衛星番号や上空の配置、時間帯毎の観測可能衛星数等を確認する。

(2) 観測点の選点

GPS による観測の要諦はいかに衛星を安定して観測できる場所、時間帯を選定するかにある。その意味で選点は極めて重要であるが、従来の測量とは考え方が大きく異なる。GPS の場合に考慮する条件は、

- ・上空視界が確保できること

- ・衛星との電波経路の障害物が少ないこと
- ・GPS 受信障害となるような外来雑音電波の少ないこと
- ・同時観測する他の測点の状況を考慮すること

である⁹⁾。

2.4.2 測地(座標)系

GPSはWGS84という座標系と楕円体を基準としている。WGS84座標系は地球重心を原点とした3次元直交座標系であり、地球の自転軸方向をZ軸、グリニッジ基準子午線(南北に通る線を子午線といい、旧グリニッジ天文台跡を通る基準となる子午線をグリニッジ基準子午線という)と赤道が交わる方向をX軸、これらと右手系をなすようにY軸をとる。これらの関係を図2.19に示す。衛星や受信機の位置はこの座標系で記述される。3次元座標はWGS84楕円体を準拠楕円体として緯度、経度、楕円体高に換算される。

なお、緯度とは赤道面を 0° とし、南北へそれぞれ 90° まで表したもので、北緯 90° 、南緯 90° はそれぞれ北極、南極である。ただし、測地、測量分野で使用する緯度とは、単に赤道面とその地点から地球の中心に引いた直線との角度(天文緯度という)ではなく、その点の接線と北極と南極を結ぶ地軸との成す角(赤道面と回転楕円体の法線のなす角)とされている。球体の場合、両者は同じことを意味するが、楕円体の場合は扁平の分だけ異なってくる。

一方、経度はグリニッジ基準子午線を 0° とし、単純に東西へそれぞれ 180° まで表したもので、東経 180° と西経 180° は同じ場所を示す。この角度は、その点を通る子午線とグリニッジ基準子午線との角度を表している。

図2.20に緯度と経度の意味を図示する。

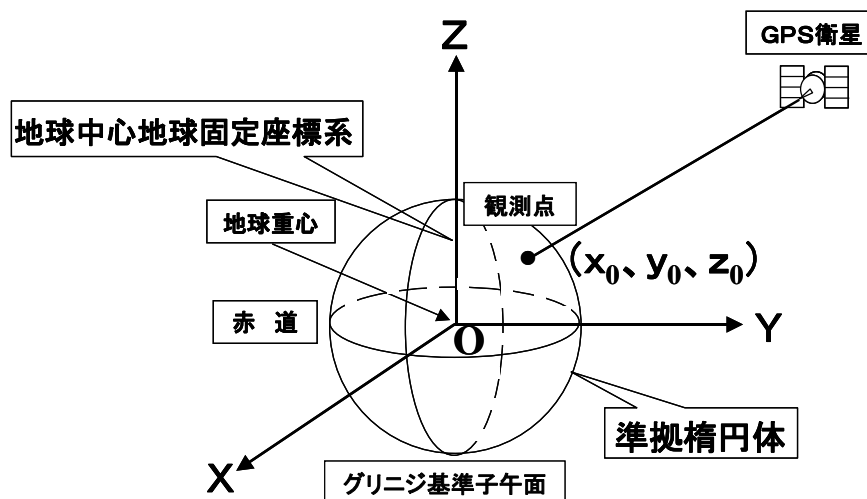


図 2.19 三次元直交座標系

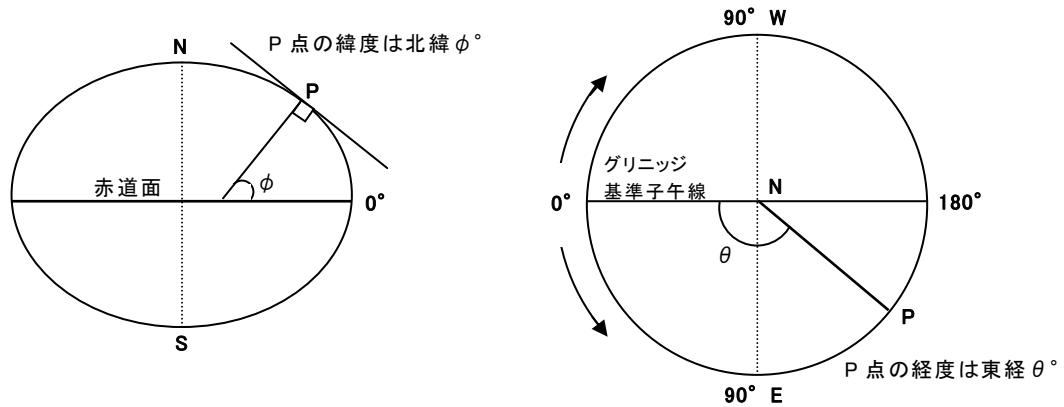


図 2.20 緯度と経度

一方、楕円体は赤道半径 a と扁平率 f で定義される。

扁平率 f は

$$f = (a - b) / a \quad (2.10)$$

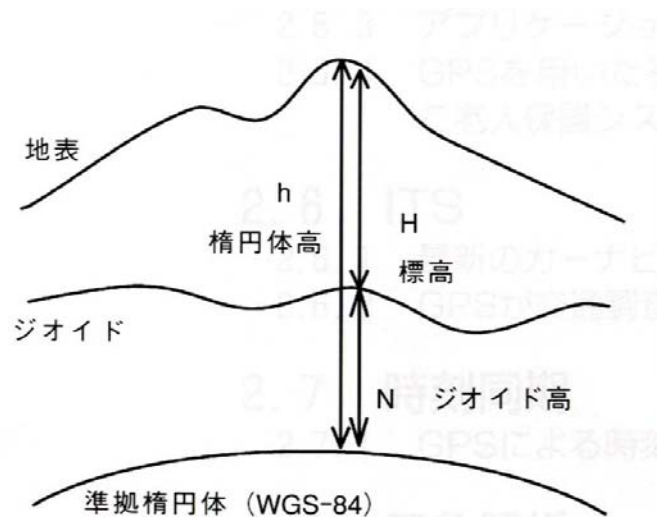
で表される。ただし、 b は短軸の長さである。表 2.6 に主な楕円体の定数を示す。

わが国では改正測量法の施行前は、明治時代に当時の東京天文台の緯度・経度が天文観測によって決定され、日本経緯度原点となった。わが国の測地系は準拠楕円体としてベッセル楕円体を使用しており、「日本測地系」と呼んでいる。2001 年 6 月 20 日に測量法が改正され、2002 年 4 月 1 日から世界測地系 ITRF94(International Terrestrial Reference Frame 1994)と GRS80(Geodetic Reference System)楕円体が採用され、公共的な測量成果は全てこの座標系に準拠することになった。

GPS で使用する WGS84 座標系と WGS84 楕円体は ITRF94 座標系と GRS80 楕円体と各々実用上ほぼ同じと考えて良いが、日本測地系とは異なるため、変換式によって使い分けているのが現状である。

表 2.6 主な楕円体の定数

楕円体	赤道半径 a (m)	逆扁平率 $1/f$
WGS84	6378137	298.257223563
GRS80	6378137	298.257222101
ベッセル	6377397.155	299.1528128

図 2.21 標高, 楕円体高, ジオイド高の関係¹⁾

2.4.3 高さの基準

前項で各測地系間は数式でデータ変換できると記述したが, 高さに関してはジオイド(geoid)の問題があるため単純には変換することはできない。

GPS による測位で求められる位置は, 直接的には WGS84 座標系での3次元直交座標系であるが, この値を WGS84 楕円体上の緯度, 経度, 高さに変換して利用している。したがって, GPS から得られる高さは WGS84 楕円体面からの高さであり, 楕円体高となる。一方, 従来の水準測量で得られる高さである標高はジオイド面を基準とする高さである。ジオイドとは地球重力の等ポテンシャル面のうち平均海面に一致するものである。ジオイド面は楕円体面とは一致しない。楕円体からジオイドまでの高さをジオイド高という。このため, GPS で観測した高さ(楕円体高)は従来の水準測量(標高)とは一致せず, ジオイド高を補正する必要がある。図 2.21 に楕円体高と標高, ジオイド高の関係を示す。また, それらの関係を次の式で表される。

$$h = H + N \quad (2.11)$$

h : 楕円体高

H : 標高

N : ジオイド高

なお, 日本国内における任意の位置におけるジオイド高は国土地理院によって整備されたジオイドモデルによって推定できる。

2.5 GPS 関連のインフラストラクチャ

2.5.1 電子基準点

電子基準点とは図 2.22 に示すように国土地理院が全国に約 1,200 点配備している GPS 連続観測局である。GPS 電波を連続して受信している電子的な基準点であり、基本測量や公共測量に利用される。また、連続観測によって地殻の変動検出、地震及び火山活動の監視に利用されている。

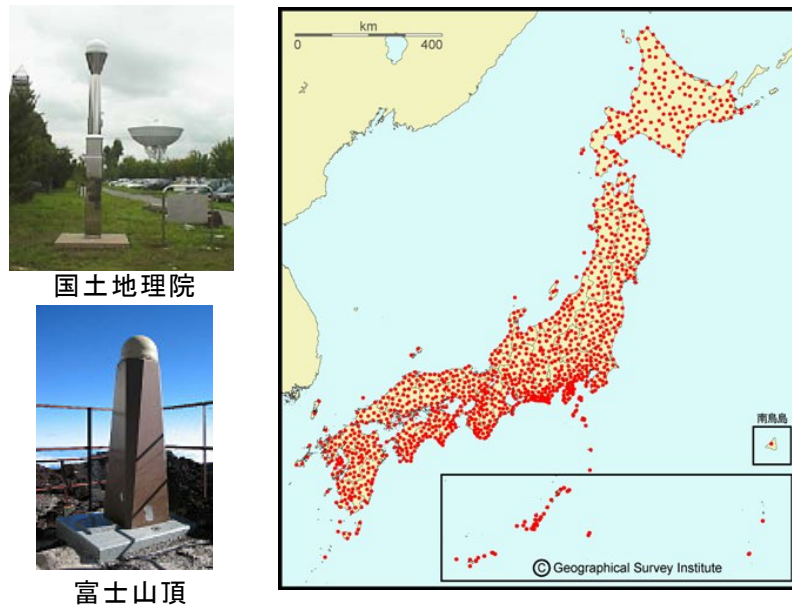


図 2.22 電子基準点と配置状況¹⁰⁾

2.5.2 ネットワーク型 RTK-GPS

RTK-GPS では固定局からの移動局までの距離が十数 km を超えるような長い場合、初期化に要する時間が通常より長くなる、測位誤差が大きくなるなどの現象が生じる。これは固定局と移動局の間の距離が大きくなると、各々の上空での電離層や対流圏の状態の差が無視できない量となることが原因である。電子基準点の間隔は 20km～30km であるので、電子基準点を固定局とする RTK-GPS では安定した測位ができない場合が出てくる。

そこで、近年、複数の電子基準点での GPS 観測データを処理することにより、それらの電子基準点で囲まれる領域の電離層遅延等の補正を行ったデータを提供して、領域内であれば安定した測位を実現する技術が開発され、運用されている。これをネットワーク型 RTK-GPS と呼んでいる。

ネットワーク型 RTK-GPS の概略の原理は次のとおりである。図 2.23 に示すように実基準点 3 点で囲まれた領域内に移動局があり、その近傍に仮想基準点 V を考える。V の位置は移動局が単独測位によって測定した値をとる。仮にこの仮想基準点に本当の基準点が置かれていたとした時、その受信機によって測定されるであろう観測量を、周辺の複数の実基準点の観測量から推定して観測量を作成し、移動局へ放送して基線解析を行う方式である。図 2.23 では 3

つの基準点での観測量から平面的な観測量分布を設定して、その中に存在する仮想基準点での観測量を求めている。仮想観測量としては、受信した各衛星電波のL1, L2の搬送波位相積算値, C/Aコードの擬似距離であり, これらは電離層と対流圏における電波遅延に対して線形補間(通常は1次補間)を行った値である。ネットワーク型 RTK-GPS にはいくつか方式があるが, ここでは VRS 方式と FKP 方式について説明する。

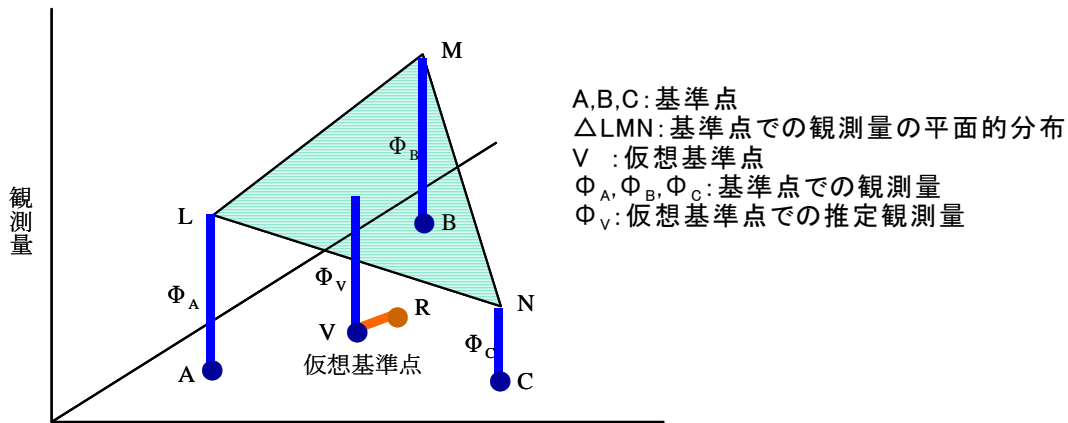


図 2.23 仮想観測量の原理 ¹¹⁾

(1) VRS 方式

VRS(Virtual Reference Station)方式では, 図 2.24 に示すように, 以下の手順で RTK-GPS を行う。

①各基準点を結んだ計算センターで連続観測量をリアルタイムに収集する。②移動局で携帯電話により単独測位による概略位置(V)をセンターに送信する。③計算センターでその位置(V)に対応した仮想観測量を作成する。④移動局で携帯電話により仮想基準点の位置, 各仮想観測量を受信する。⑤これらのデータを GPS 受信機に取込んで干渉測位計算を実施する。

VRS 方式では移動局と計算センターとの間で双方向の通信システムが必要となる。

(2) FKP 方式

FKP(Flächen Korrektur Parameter = Area Correction Parameters)方式は, 図 2.25 に示すように, 仮想基準点(V)での仮想観測量を作成するための面パラメータを周辺の基準点の観測データから計算センター側で生成して移動局に送り, 移動局はその面パラメータを用いて仮想観測量を作成する方式である。面パラメータとは図 2.23 の LMN の面を定義するパラメータである。FKP 方式では, 計算センターと移動局間は片道通信でよく, 放送形式をとることもできる。

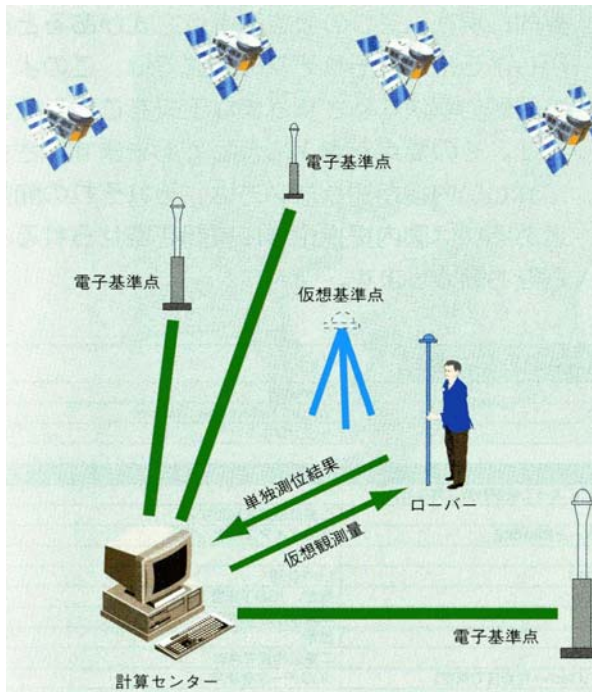


図 2.24 VRS 方式のしくみ¹¹⁾

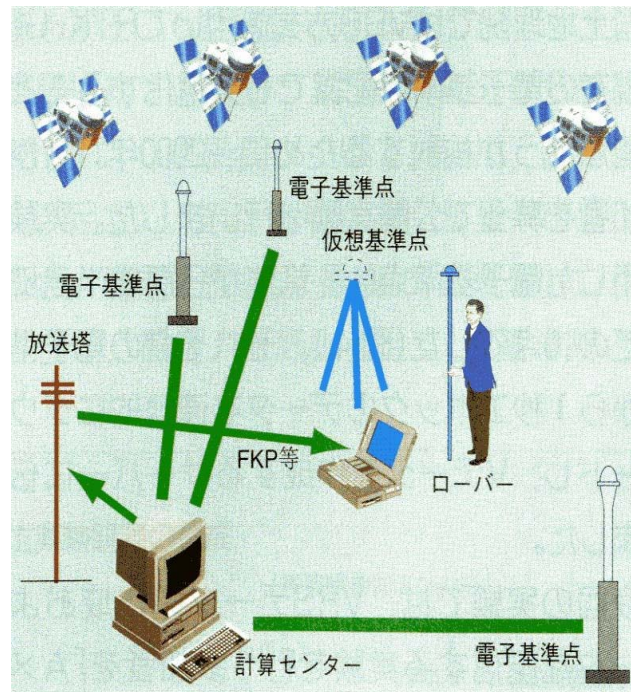


図 2.25 FKP 方式のしくみ¹¹⁾

2.5.3 その他の関連システム

(1) ディファレンシャル測位

①FM 多重による DGPS 補正データ放送

ラジオのFM 多重放送を利用して補正情報を送るシステムであり、カーナビゲーションシステムに利用されている。

②中波ビーコンによる DGPS 補正データ放送

海上保安庁が中波ビーコンを利用して全国 27 箇所の灯台からディファレンシャル補正情報を放送し、船舶のナビゲーションに用いられている。中波ビーコンは電波の出力も大きく、送信局から 200km 離れていても受信が可能である。日本の沿岸部を中心に利用可能であり、内陸部でも利用できる場合がある。

(2) RTK-GPS

全国の重要港湾と大型海洋工事においては海上 DGPS 利用推進協議会が RTK-GPS の補正情報サービスを行っている

2.6 GPS 関連技術の動向

GPS 以外にも有力な衛星測位システムが運用、計画されており、2007 年に施行された地理空間利用促進基本法でもそれら技術の利活用が検討されている。ここでは、土木分野に適用が期待される関連技術動向について、その代表的なものを記す。

衛星測位技術はもともと軍事用に開発された経緯があり、現在でも戦車や軍艦、戦闘機やミサイルの誘導などに利用されているが、近年、自動車、船舶、航空機などの各種ナビゲーションや、都市開発等での GIS を利用した管理事業、測量設計事業など多彩な方面で GPS が利用されている。また、これまで利用できなかった場所への利用拡大方法の研究開発なども盛んに行われている。アメリカ以外でも、ロシアや欧州連合(EU)および欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)などでの衛星測位システムの計画が発表されており、利用範囲の拡大が期待できる。さらに、「精度の向上」と「コストの低減」、「高層ビルなどによる電波の遮断の低減」、「室内、地下空間での測位」などが求められており、これらの課題を解決する方法として、「準天頂衛星」や「疑似衛星:Pseudolites (以下、スードライトと称す)」, 第3の周波数 L5 を利用する方法などが研究されている。

2.6.1 世界の衛星測位システムの動向

アメリカの GPS 以外の世界の代表的な汎地球測位システムとして、ロシアの GLONASS(GLObal NAvigation Satellite System)と欧州連合(EU)および欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)で計画されている Galileo システムがある。表 2.7 に各測位システムの比較を示す。現在では GNSS(Global Navigation Satellite System)が衛星を使って全世界をカバーする衛星測位システム全般を指す言葉として一般に用いられるようになってきている。

表 2.7 衛星測位システムの比較

項目	GPS	GLONASS	GALILEO
運用国名	米国	ロシア	欧州連合(EU)
衛星数	24	24	30
軌道面数	6 軌道	3 軌道	3 軌道
軌道半径	26560km	25510km	29980km
軌道傾斜	55°	64.8°	56°
周回周期	11 時間 58 分 02 秒	11 時間 15 分 40 秒	14 時間 21 分 36 秒
多重方式	CDMA	FDMA	CDMA
原子時計の種類	ルビジウム原子 セシウム原子	セシウム原子	ルビジウム原子 水素メーザー原子

2.6.2 準天頂衛星

GPS 衛星が周回衛星であることに起因して、街路樹、高層ビルや山蔭などでは、衛星の位置によって衛星からの電波が遮断することがあり、継続して信頼性のある測位データが得られないという問題が指摘されていた。常時測位の実現に向け、常に日本の天頂付近から GPS の補完を行う方法として、準天頂衛星システムが検討されている。

人工衛星 3 機で構成する準天頂衛星システムは、サービスエリアのほぼ真上となる天頂付近に常時、1 機の衛星がとどまる。天頂からのサービスによって GPS 測位信号を補完することでユーザーの可視性を大幅に改善することが可能となる。図 2.26 に準天頂衛星と静止衛星と GPS の位置関係を示す。

準天頂衛星を用いると、ビルや山などの障害物の影響を少なくすることが可能となる。また、GPS の精度の改善なども期待されている。2008 年度に成立した「宇宙基本法」にも、準天頂衛星の 2010 年度の打ち上げに向けた計画が盛り込まれている。

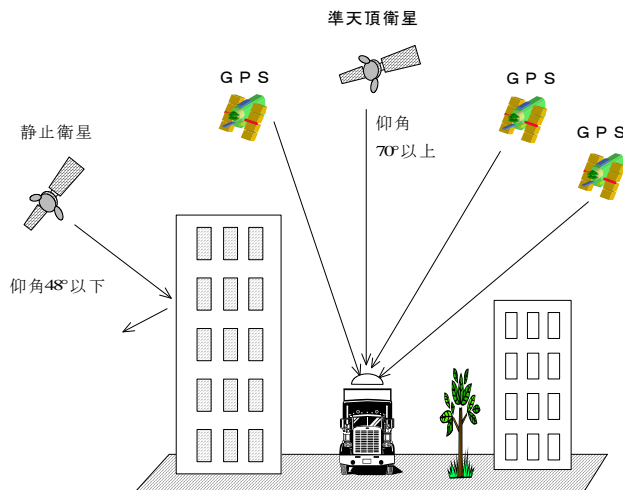


図 2.26 準天頂衛星と静止衛星と GPS¹²⁾

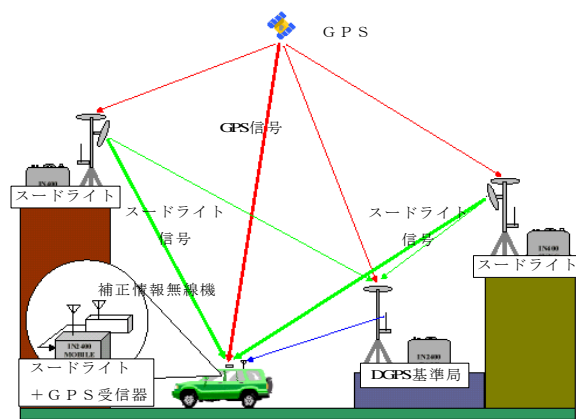
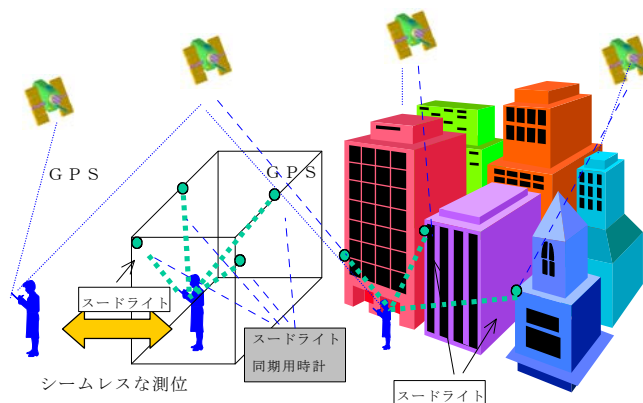
2.6.3 スードライト

GPS は原理上 GPS 衛星を同時に4～5個受信する必要があるため天空が開けている場所ではしか利用できない。そのため、地下鉄や地下街などの地下空間はもちろんのこと都会のビルディングの間や、山間部なども GPS を利用することができない。

特に地下空間は準天頂衛星でもカバーすることは出来ない。スードライトは従来不可能であると考えられていた場所において GPS が利用できるようにする技術である。その技術とは、地上にスードライト“疑似的(Pseudo)な衛星(Satellite)”を設置するものである。スードライトは衛星が受信できない、もしくは不足する測量エリアにおいてスードライトを設置することで GPS 測量を可能とするシステムである。図 2.27 のようなビルディングが建ち並ぶ都市部においては GPS 衛星がビルディングに遮られて測位に必要な個数受信することができない、そのような時にビルディングの屋上へスードライトを設置し都市部でも GPS 測位を可能にするものである。また、最近では室内や地下街での測位にも適用しようという考えもあり、図 2.28 のように屋外からのシームレスな測位を実現する研究も進められている。

スードライトは GPS 衛星と同じ周波数で同じ情報を送信している。そのため情報が輻輳しな

いように GPS の時間と同期をとる必要がある。しかしそのためには高価な原子時計が必要となるが、この問題を GPS から送られてくるタイミング情報を利用することで解決している。図 2.27 においてスードライトが GPS の電波を受信しているが、これは GPS の時計情報とタイミングをとるためである。このようにしてスードライトは GPS 衛星と同期をとりながらスードライトの位置情報等を送信する。また、スードライトの受信機は GPS と両方の信号を受信できることが必要となるが、GPS 衛星からの電波は弱く、スードライトは電波法と電波の特性上から、遠い所は極端に弱く、近い所では GPS 衛星からの電波も消してしまうほど強くなるため、実用化までの課題はまだ多いのが現状である。

図 2.27 スードライトの概念図¹²⁾図 2.28 屋外～室内のシームレスな測位イメージ¹²⁾

2.6.4 狭域ディファレンシャルと広域ディファレンシャル

(1) 狭域ディファレンシャル

GPS 衛星から利用者まで電波が届くまでに電離層や対流圏を通過する時の伝搬遅延が誤差として影響する。測位精度を改善するため、図 2.29 に示すように、あらかじめ測量により正確

な位置が知られた場所に固定局を設け、そこで GPS により測位された位置から各衛星までの距離と、真の位置から各衛星までの距離との差を擬似距離補正データとして、利用者に向けて放送する。利用者はその補正値を各衛星からの擬似距離に加えて補正位置を求める。この方法により、上で述べたような誤差を除くことができる。これは狭域ディファレンシャルとも呼ばれ、固定局から 200km 程の範囲であれば数十 cm～数 m の精度が得られる。

ユーザーが個別に固定局を設けるのは大変なので、海上保安庁が 1997 年 3 月から中波無線標識局から送信する中波ラジオビーコンの電波に GPS の補正情報を追加して D-GPS 固定局としての運用を開始した。現在北海道から沖縄まで一部遠方の離島海域を除く日本全国沿岸の距岸 200km 程度の海域をカバーしている。中波ラジオビーコンを受信できる GPS が安価に販売されているので、船舶のナビゲーションだけでなく一般的な深淺測量に利用されている。

カーナビ用には、FM 放送の音声周波数領域にはステレオ放送の主・副音声のほかに 76 kHz を副搬送波とするデータ送信用のチャンネルが用意されている。この方式は NHK により開発され、DARC (Data Radio Channel) 方式と名付けられている。現在多くの FM 局でこの副搬送波にいわゆる「見えるラジオ」のデータを重畳して、放送している。このデータの一部に DGPS 補正データが挿入され全国に分散する JFN ネット等 39 局から、主にカーナビゲーション用の GPS 受信機を対象として、約 5 秒のデータ更新周期で送信されている。固定局は全国 7 か所に設置されている。

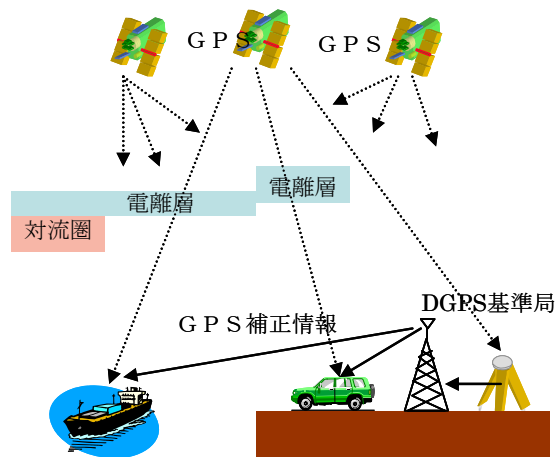


図 2.29 狭域ディファレンシャルシステム ¹²⁾

(2) 広域ディファレンシャル

世界中を移動する船舶や航空機には、広範囲でサービスする必要がある。このため、狭域ディファレンシャル方式を船舶や航空機に利用しようとする、多数の固定局が必要となつてし

まうだけでなく、大洋の中央では補正情報の通信方式についても検討する必要がある。地球規模にわたり広域での GPS の精度を向上させる広域ディファレンシャル GPS の導入が必要であった。

数千 km の範囲を対象とする広域システムでは、衛星位置誤差、衛星時刻誤差、電離層伝搬誤差を地上のモニタ局で受信した GPS データを基に推定し、この推定した誤差情報を静止衛星経由で放送することで広い地域での測位精度を向上させている。

また、広域システムでは、測位精度を向上させるためのディファレンシャル情報を広い範囲に送信するだけではなく、衛星の軌道配置又は衛星の故障による測位精度の劣化を予想し、利用者にシステムを利用することができるかどうかを示すアベイラビリティの機能や、高速で移動する航空機などへの情報として、GPS 衛星に重大な故障等の不具合が発生した場合、地上で GPS 信号等を監視し異常を検出して測位システムの異常を即時に知らせる機能などが搭載されている。

このシステムによるサービスのエリアは、INMARSAT (International Marine Satellite Telecommunication Organization:国際海事衛星機構のサービス)などを利用しており、広範囲にわたっている。

米国の WAAS, 欧州の EGNOS(European Geostationary Overlay Service), 我が国の MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System)を総称して SBAS (Satellite-Based Augmentation System)と言い、図 2.30 に示す GPS 補強システムが構築されている。補正情報などの通信衛星としては MTSAT (Multi-purpose Transportation Satellites:多目的運輸衛星)や INMARSAT が利用される。現在実用化しているのは米国の WAAS のみである。WAAS を利用した場合 GPS の精度は 2~3m となるが、残念ながら我が国の付近では利用できない。

我が国の MTSAT 衛星は 2005 年 2 月 26 日に MTSAT-1R が、2006 年 2 月 18 日には MTSAT-2 がそれぞれ打上げられ、2007 年 9 月 27 日に MSAS の供用が開始されている。

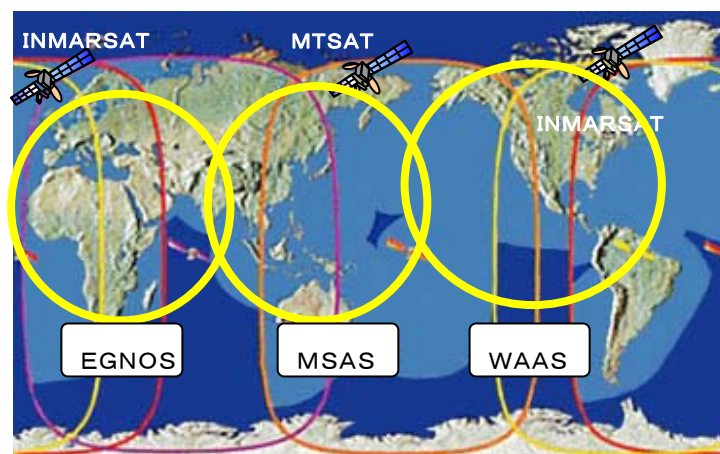


図 2.30 GPS 補強システム(SBAS)¹²⁾

[参考文献]

- 1) 重松文治・佐田達典:GPS の解説, GPS フロンティア, 日本測量協会, pp.11～22, 2004.
- 2) 安田明生:GPSの測位原理, GPSシンポジウム'99, 日本航海学会, pp.191～196, 1999.
- 3) 土屋 淳・辻 宏道:「新・GPS 測量の基礎」, 日本測量協会, pp.92～93, 2002.
- 4) 情報化施工と GPS, 地盤工学会誌 「土と基礎」, Vol53, No.10, pp.48～54, 2005.
- 5) Pratap Misra, Per Enge:「精説 GPS」, 日本航海学会 GPS 研究会訳, pp.146～148, 2004.
- 6) 日本測量機器工業会編:最新測量機器便覧, 山海堂, pp.179～185, 2003
- 7) 情報化施工と GPS, 地盤工学会誌 「土と基礎」, Vol53, No.11, pp.45～52, 2005.
- 8) 土屋 淳・辻 宏道:「新・GPS 測量の基礎」, 日本測量協会, pp.130～131, 2002.
- 9) 土屋 淳・辻 宏道:「新訂版やさしい GPS 測量」, 日本測量協会, 2002.
- 10) 国交省国土地理院 「GPS 連続観測システムー電子基準点とは」
[URL:http://terras.gsi.go.jp/gps/gps-based_control_station.html](http://terras.gsi.go.jp/gps/gps-based_control_station.html)(最終アクセス 2009.5.8)
- 11) 西修二郎・今給黎哲郎・土屋 淳:VRS 方式によるリアルタイム測位, GPS フロンティア, 日本測量協会, pp.24～31, 2004.
- 12) 情報化施工と GPS, 地盤工学会誌 「土と基礎」, Vol54, No.3, pp.87～96, 2006.

3. IT活用情報化施工の現状と動向

3.1 はじめに

第2章で述べた GPS を技術の中心として、筆者はまず土工事における情報化施工を検討し、1997 年から各要素システム、統合システムを開発しており、その開発状況については、第4章で記す。その後、GPS や PC の低価格化、高機能化が進んできたこともあり、より多くの施工現場への適用を促進しようとする活動が国交省を主体として実施されてきた。その一つの結果として、2001 年に『情報化施工のビジョン-21 世紀の建設現場を支える情報化施工』という提言が示された。これは、施工だけではなく計画、設計から品質管理、維持管理までの建設プロジェクト全体の効率化を狙いとしたもので、その後も継続して技術の展開が試みられている状況である。

このように、情報化施工は単に施工活動の省力化、効率化だけではなく、建設マネジメント全体の活動に波及する側面も持っているため、昨今の建設を取り巻く厳しい環境の中で、建設の革新につながる技術の一つとして位置付けられている。

本章では、情報化施工の現状技術とともに、最近の建設施工を取り巻く環境に対して情報化施工に期待される役割を論じる。また、情報化施工に関する国内外の動向を概観し、現在最も大きな課題として挙げられている、情報化施工技術の普及方策について検討する。

3.2 情報化施工の現状

第1章でも述べたように、土木施工分野において、軟弱地盤上の盛土工事、トンネル工事やシールド工事、基礎工事などの特殊な工事において、施工の信頼性を確保するために地山状況を計測しながら施工する観測施工を指していた情報化施工という名称は、最近では、IT(情報技術)を建設工事に利用して生産性の向上と施工品質の確保を実現する新しい施工システムの総称として使用されるようになってきている。

情報化施工の導入目的として、機能面からは2つに分けることができると考える。

一つは、ITを用いて誰でも現場測量が行えるようになることや、建設機械の自動化、半自動化を図ることなどによって、現場作業の効率化(工期短縮・省人化)を実現することにある。これに付随して、例えば、誰でも簡単に位置が計測できる、あるいは機械の操縦を自動的に行えるということは、測量作業や掘削作業、成形作業、盛土の締固作業に人為差が生じない、すなわち品質のバラツキを減らすことができることにもなり、熟練者不足にも対応できることになる。また、機械が稼動している場所にいる人の存在が低減されるので、工事現場の安全性も向上するようになるといったメリットが考えられる。

もう一つの機能は、施工において得られる情報を現場で実務にたずさわる技術者の判断の高度化に利用する機能である。我が国は、戦後の復興期に効率的にインフラ整備を行うために、基準やマニュアルの整備を進めてきた。そのおかげで、我が国は他に類をみないほど効率

的に所定の品質の社会基盤整備を達成することができた。このことは、基準やマニュアルによる一律管理の疑うべくもない成果といえ、20世紀型社会基盤整備の最も大きな特徴といえる。しかしながら、一方で、一律管理は、不確定要因に起因する無駄を避けることができないという課題を有している。すなわち、一般の建設工事では、天候や地質のばらつきに代表される不確定要因を前提に構造物の設計や施工計画を作成せざるを得ないため、一律管理に従う限りはこれらの過程では安全率の導入など、余裕を持った計画を立てることになる。ところが、限られた資源の有効利用や工事に伴う環境への影響軽減、構造物の品質の向上に関する要求が高まる今日、基準やマニュアルに従う一律管理だけでは、これらの要求に十分には応えることができず、一律管理に加えて現場の状況に応じて柔軟に対応する個別評価の仕組みを取り入れることが求められる。すなわち、今後の社会基盤整備では、基準やマニュアルを標準としつつも、それを絶対的なものとせず、現場の状況に応じて柔軟に対応することでより精緻な工事を行うことが求められ、これを実現するために、技術者にはこれまで以上に高度な判断力を有することが要求されることになる。このため、情報化施工により質の良い情報を技術者に提供することができるので、的確な判断を引き出すという技術者の判断支援の役割をも担っていると考えられる。

すなわち、情報化施工は、施工における作業効率や安全性の向上に供する技術であるとともに、これまでの建設計画、設計、施工管理等、広範囲にわたる建設活動の考え方を変える、まさに変革を促す技術だと位置づけられるといえる。

3.2.1 情報化施工とは

情報化施工は、建設事業の調査、設計、施工、監督・検査、維持管理という建設生産プロセスのうち「施工」に注目して、ITの活用により各プロセスから得られる電子情報を活用して高効率・高精度な施工を実現するものである。さらに施工で得られる電子情報を他のプロセスに活用することによって、建設生産プロセス全体における生産性の向上や品質の確保を図ることを目的としたシステムである。図 3.1 にその概念を示す。

情報化施工は施工技術ではあるが、施工会社のみならず、

- ・ 求める出来形・品質が実現しているかどうか確実に確認できる
- ・ 効率的・効果的な補修・維持管理が可能となり、メンテナンスコスト縮減が期待できる
- ・ 施工精度の向上によって設計のスリム化が期待できる

等、工事発注者のメリットも大いに期待できる。

また、確実に安心できる品質を短い工期で提供できることは、最終的に国民のメリットにもつながるシステムだと位置づけられるものと言えよう。

図 3.1 情報化施工の概念と情報化施工システムの概要¹⁾

3.2.2 情報化施工技術の状況

(1) 建設施工における自動化技術、ITの導入経緯と現状

建設施工における自動化技術は、製造業における産業ロボット導入による生産性向上に触発され、多くのロボット技術として 1980 年代に研究・開発が進められた。当時の技術は、建設施工向けの位置特定技術、移動体制御技術、情報通信技術が未発達で、常時施工場所を移動しながら作業する建設施工に利用するレベルになかったため、現場の期待する作業速度、精度が実現できないという課題を抱えていた。これに加え、屋外・単品・受注生産という現場の特性により、定型化した自動化システムが利用できないという課題もあった。

その後、通信に関する規制緩和や通信技術の発展、TS(Total Station:測距測角儀)や GPS などの位置特定技術の開発・普及などに伴い、2000 年代に入ってようやく建設施工に利用できる環境が整い、前述の技術的な課題解決に向けた研究・開発が進められた。近年になると、次章で説明する、建設機械に設計データを搭載し、設計データに基づいて機械の動作を制御するマシンコントロールシステムが開発されるなど、建設施工への自動化技術が実用化の段階を迎えた。

一方、制度面においても、性能規定発注方式や総合評価方式などの入札契約方式の導入や「公共工事の品質確保の促進に関する法律（品確法）」の施行など、公共工事の品質の確保や技術力による評価の重要性が高まるとともに、公共投資の減少にも対応できる効率的な生産システムが求められるようになってきた。

このような背景のもと、最近では一部の大規模現場や高精度施工が必要な舗装工事などにおいて、情報化施工を適用した事例が増加しつつある。

（2）情報化施工技術の事例

既に製品化されている情報化施工機器や、企業が独自に開発した情報化施工システム、研究開発段階にある品質検査技術など、情報化施工を構成する代表的な技術について述べる。

a. GPS や TS による出来形管理技術

GPS や TS などの各種の測量機器を利用し、特殊技能がなくても簡単に建設現場における測量作業が行える技術が開発され、多くの現場に導入されつつある。この技術は、GPS や TS の本来持つ機能である「便利な測量機器」として現場利用法であり、作業の効率化のオーソドックスな形と言える。これまで、施工業者を中心に開発、実用化が進められている。これについては、4.2.2(1)で取り上げる。

本技術については、最近、国土交通省管轄の工事などでも、試行工事を通じてその技術の適用性の検証を行い、出来形管理要領(案)²⁾としてとりまとめられ、2008年に本格運用が開始されている状況である。

b. 建設機械のマシンコントロール技術

製造業における数値制御技術（NC加工等）を土木施工の分野に応用しようとするもので、官民による技術開発が盛んに行われている分野である。

例えば、ブルドーザに3次元設計データを入力し、TS やレーザを用いた計測技術により排土板の位置（施工状況）と設計値（施工目標）との差異を数値的に算出し、所要の施工精度となるようにオペレータに指示（モニタ表示等）する「マシンガイダンス技術」と称される技術は 1990 年代中頃に実用化されたものである。

最近では、マシンガイダンス技術に建設機械の油圧制御技術を組合せることで、3次元設計データに従って排土板を自動制御する「マシンコントロール技術」が開発されている。また、掘削作業や法面整形など、より複雑な作業で用いられる油圧ショベルに対しても適用し、施工の効率化や施工精度の確保を実現している。これらについては、4.2.2(3)で詳しく述べる。

c. ITを活用した新たな品質管理技術

本研究で示す締固め機械の走行軌跡から締固め回数を管理する技術は、測量、位置計測という GPS や TS の本来の機能を活用しているものの土構造物の施工品質を確保するというまったく新しい考え方であり、従来のサンプリング管理法と比較して、施工エリア全域にわたるき

め細かい管理が行えることや、現地での手作業が不要のために安全性が確保されることなどの特長により、大規模土工やダム工事などにおいて導入されている。国土交通省でも、本技術を用いた盛土の締固め情報化施工管理要領(案)³⁾をとりまとめ、砂置換法、RI計器を用いた方法と合わせて、第3の施工管理方法として位置付けている。本技術に関しては、4.2.2(5)で詳しく述べる。

d. 施工情報の統合管理技術

建設プロセス全体における生産性向上や品質確保は、各プロセス間で情報をシームレスに共有する情報の統合管理が必要であり、この技術の下で前述 a.～c.の技術がより効果を発揮する。例えば、大規模な採土工事において、掘削から集土積込、運搬、破碎、貯鉱、積み出しの各作業工程に関する建設機械や生産設備の稼働情報、地質状況などを統合的に管理し、最適化手法を導入することで、生産性の向上を実現する技術が導入されている。

また、製造業における生産管理の手法を施工に応用し、3次元設計データ、計測データ、品質管理データ、建設機械の現在位置や稼働履歴を統合管理する技術やCAD上で工事のプロセスをシミュレートして時系列に管理する技術の開発や、さらに、上記のようなシステムで得られる施工中の品質管理データや計測データをGIS(地理情報システム)上で管理して、完成後の維持管理の初期値として利用する研究なども進められている。

3.2.3 建設施工を取り巻く課題

(1) 生産効率の向上

建設施工は、国民生活や経済活動の基盤となる質の高い社会資本を安価に提供するための生産技術として重要な役割を担っている。これまで、かつての人力施工から建設機械の導入、さらには建設機械の性能の向上という「建設施工の機械化」により、その生産効率を高めてきた。しかしながら、現実的には図 3.2 に示すように他産業に比べまだまだ建設業の生産性は低いといわざるを得ない状況である。また、今後予想されている人口減少・少子高齢化の急速な進展や、グローバル化の爆発的進展、地球規模での資源・環境問題という状況下においても、建設施工がその役割を果たすためには、これまでの機械化をさらに推し進めるだけでなく、ITを活用することにより、自動化技術や最適化技術などを建設施工にも適用し、投入する資源(エネルギーや資材等)を少なくする効率的な施工を実現していくことが、将来の重要な課題となることが予想される。



(a) 労働賃金の推移



(b) 労働時間の推移

図 3.2 産業界における建設業の生産性⁴⁾

(2) 熟練技術者・技能者の不足(人口減少・少子高齢化への対応)

わが国はかつて経験したことのない人口減少社会を迎え、若年労働者の確保が経済・産業全体で大きな課題となっている。その中で、建設産業は、厳しい経営環境の下で賃金が低下傾向にあるなど労働条件等の悪化が進んでいる。また、建設産業に対する将来的な不安や、建設現場に対する3K(きつい, 汚い, 危険)のイメージによって、若年労働者の入職者の減少が進んでいる。すでに、図 3.3 に示すように 45 歳以上の就業者が 5 割以上を占めるなど高齢化が急速に進展しており、団塊世代のリタイアに伴い、熟練技術者・技能労働者の不足が現実の問題となりつつある。さらに、図 3.4 に示すように、建設業に入職する若者の数も顕著な減少傾向にあり、将来的な生産年齢人口の減少も予想されることから、熟練技術者・技能労働者の確保が今後、益々困難になることが懸念される。

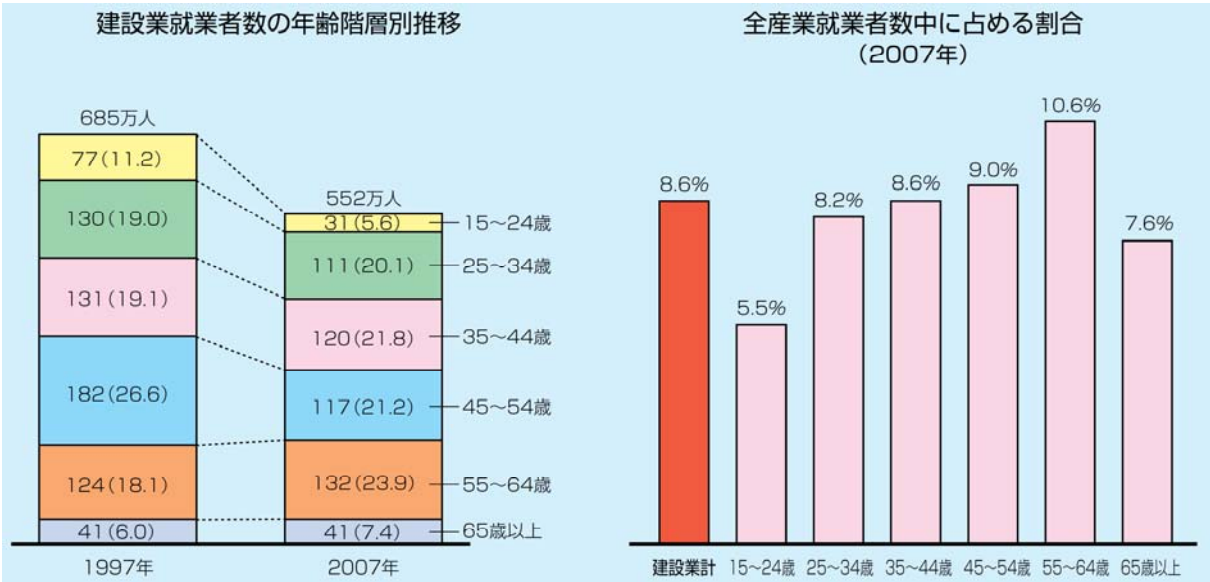


図 3.3 建設就業者の年齢分布 ⁴⁾

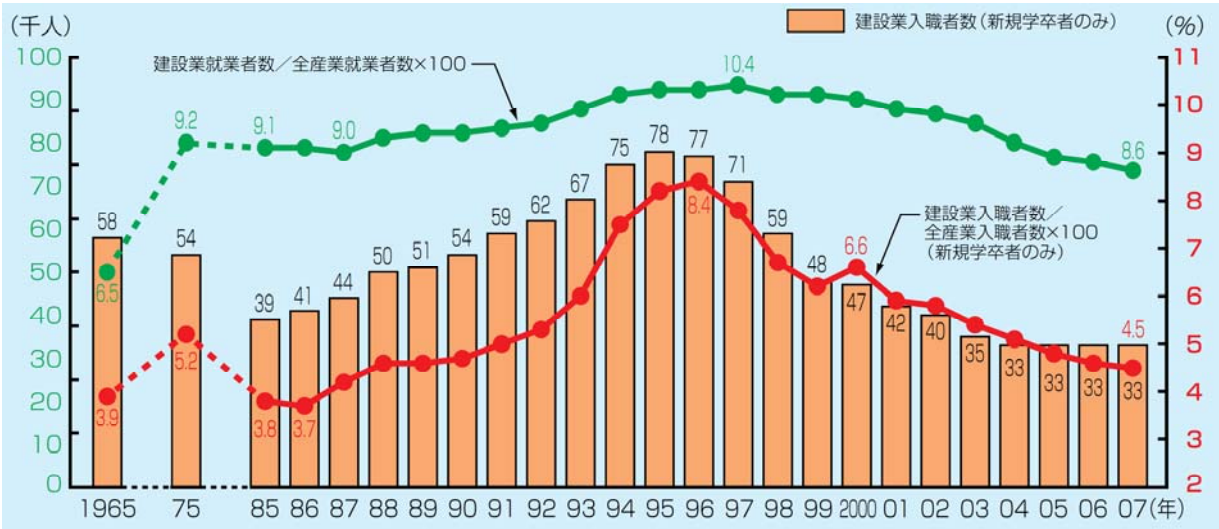


図 3.4 建設業における新規学卒者の入職状況 ⁴⁾

(3) 発注環境の変化と品質確認の重要性の高まり

2005年4月より施行された「公共工事の品質確保の促進に関する法律」により、公共工事の品質は、経済性に配慮しつつ価格以外の多様な要素をも考慮し、価格及び品質が総合的に優れた内容の契約がなされることにより、確保されなければならない⁵⁾と規定されている。2005年9月に出された「公共工事における総合評価方式活用ガイドライン」の設立趣意書によれば、公共工事は、調達時点で品質を確認できる物品の購入とは基本的に異なり、施工者の技術力等により品質が左右される。そのため、発注者は、個々の工事の内容に応じて適切な技術力を持つ企業を競争参加者として選定するとともに、技術力を評価した落札者の決定や適切な監督・検査等の実施により公共工事の品質を確保する必要がある⁶⁾と謳われている。

このように、発注者責任の明確化と公共工事の調達システム全体の見直し・検討などによって発注環境が大きく変化している。さらに、ダンピング入札の増加などを背景に、手抜き工事な

どの不良工事の危険性増大が指摘される中、良質な社会資本を国民に提供するために、発注者には適切かつ効果的な監督・検査を実施することが求められている。

(4) 施工現場の安全確保

図 3.5 に過去の労働災害の発生状況の推移を示す。全体的に減少傾向にあり、建設業においても減少しているが、それでも、全産業死亡者数の 1/3 強は建設業が占めている。また、表 3.1 に過去 5 カ年(2003 年～2007 年)の土木工事における工種別死亡災害をまとめる。これを見ると、工種では「道路」が多く、原因は「建設機械等」で、建設機械との接触・下敷き・挟まれなどによるものとなっている。この死亡事故を回避するには、人と建設機械を混在させない対策が効果的であり、建設機械との接触事故の危険性が高い区域への検測作業員・作業指示者・作業補助員・普通作業員の立入りを極力少なくすることが求められる。

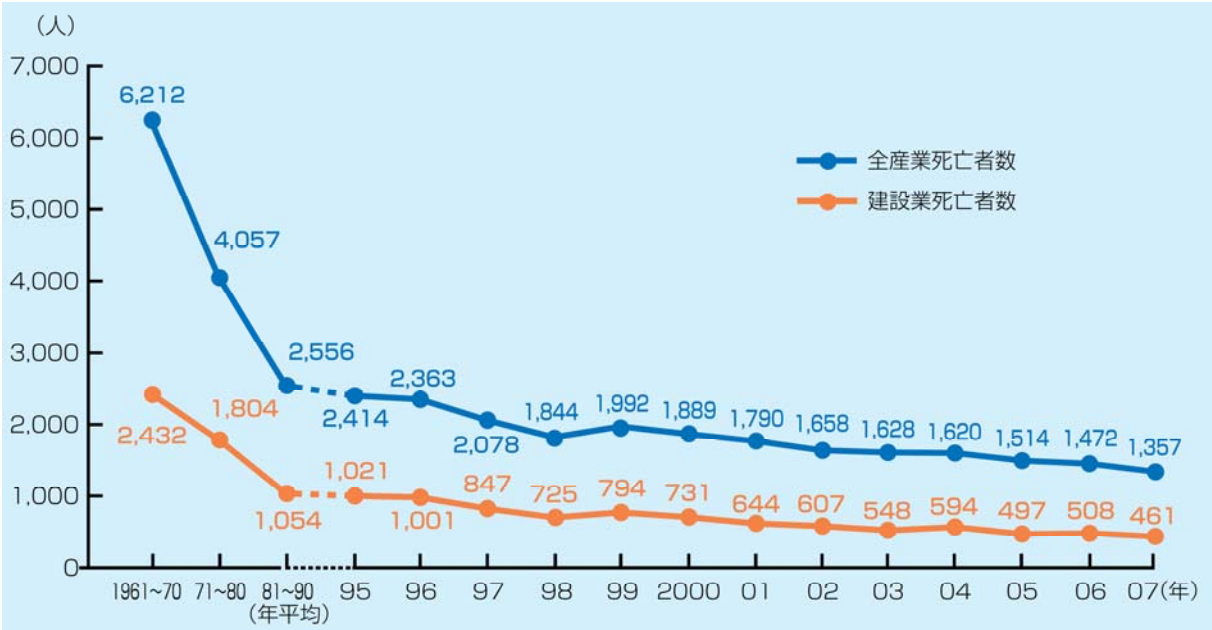


図 3.5 労働災害の発生状況の推移 ⁴⁾

表 3.1 土木工事における工種別死亡災害 ⁷⁾

	土木工事(2003 年～2007 年)												
	水力 ダム	トン ネル	地下 鉄	鉄 道	橋 梁	道 路	河 川	砂 防	土地 整理	上下 水道	港 湾	その 他	小計 (人)
墜落	6	10	2	1	28	70	16	29	12	17	6	64	261
飛来落下	1	2	0	0	4	27	8	6	8	14	3	16	89
倒壊	0	0	0	0	3	9	5	2	0	2	3	15	39
土砂崩壊	1	0	0	0	1	20	10	6	13	28	0	15	94
落盤等	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
クレーン等	0	3	0	1	4	4	5	3	0	1	3	9	33
自動車等	0	0	0	14	8	49	6	2	6	14	3	69	171
建設機械等	0	10	1	0	7	77	19	16	22	30	3	48	233
電気	0	0	0	2	0	0	2	0	1	0	0	0	5
爆発火災等	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4
取扱運転等	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	8	12
その他	1	9	0	2	6	11	8	0	6	6	9	28	86
合計(人)	9	37	3	20	61	269	79	64	68	114	30	276	1030

(5) 地球温暖化問題

1997年の京都議定書において、日本は2012年までにCO₂に代表される温室効果ガスについて1990年を基準(一部1995年)として6%削減することを目標として取り組みを進めることとしている。また、温室効果ガスの削減を補完する排出量取引についても具体的に検討が進められている等、国を挙げて「低炭素社会」に向けた活動が行われている。

建設産業は、全産業の約1割のCO₂排出量を占めており、建設施工においても、例えば建設機械の効率的な稼働による燃料消費量の削減や、建設資材の使用量の縮減等に積極的に取り組む必要がある。

(6) 国内外における競争

産業のグローバル化が進む中、我が国の建設業の海外受注額も図3.6に示すように、ここ近年増加している。今後、国内はもちろん、広がる海外市場を獲得するためには、所定の施工品質を工期内に実現できる高い技術力・施工能力が求められる。さらに、これらの技術力を発揮するためには、技術を国内外で共通利用できる環境を整備することが必要である。

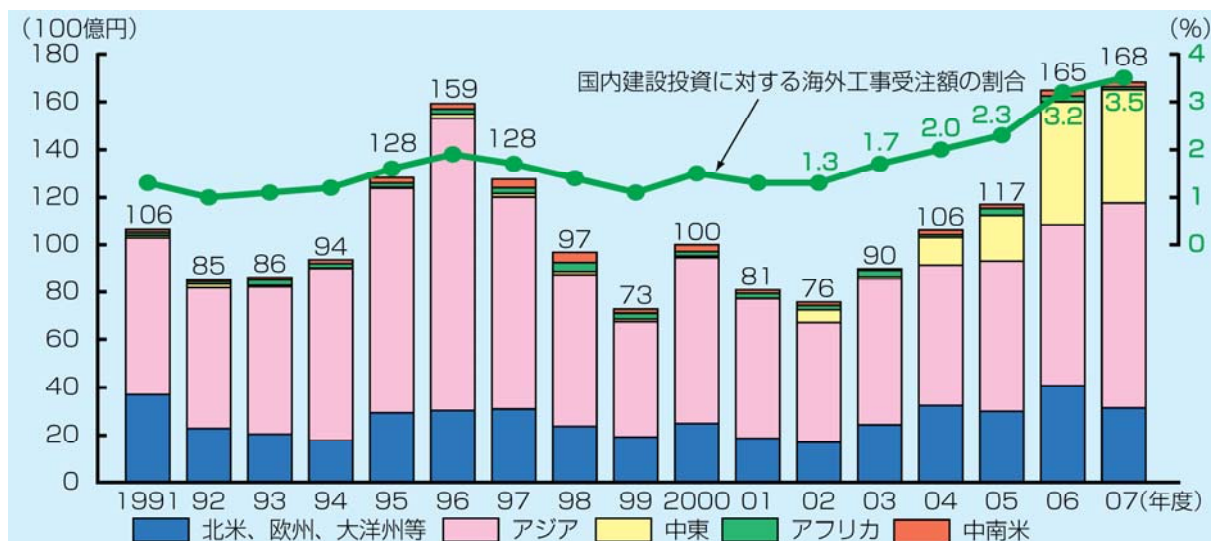
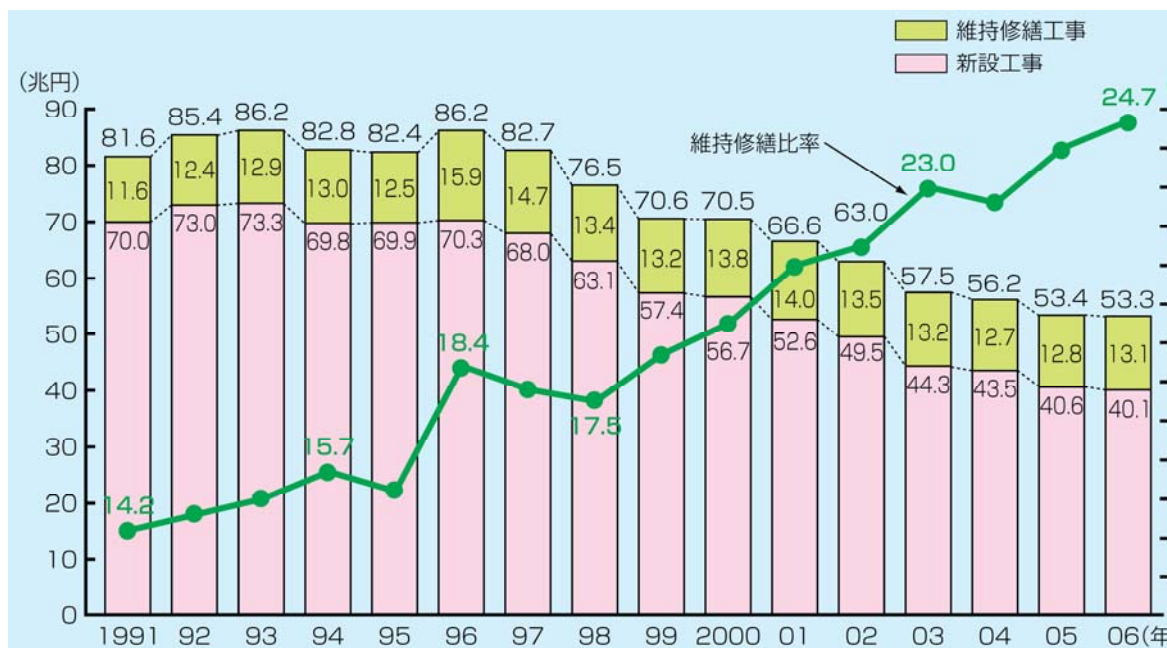


図 3.6 海外工事受注の推移 ⁴⁾

(7) 社会資本の補修・維持管理費の増大

日本では高度成長期に建設された社会資本が老朽化を迎えることから、図3.7に示すように建設投資における補修・維持管理費比率が増加しており、今後、その傾向が急速に強まることが予想され、経済的な補修・維持管理手法を確立することは緊急の課題である。施工時のデータを土木構造物のカルテとして活用することにより、合理的かつ効果的な補修・維持管理を実現する可能性が高く、今後の研究が求められる。

図 3.7 建設投資における維持管理工事費の推移⁴⁾

3.3 情報化施工を巡る国内外の動向

3.3.1 国内における最近の取り組み

(1) 国土交通省における関連施策等

a. 情報化施工のビジョンー21 世紀の建設現場を支える情報化施工ー「情報化施工促進検討委員会」

2001 年 3 月に情報化施工促進検討委員会によって、21 世紀の建設生産のブレイクスルーとなり得る情報化施工のビジョンが示され、このビジョンの実現に向けた課題や産・学・官が果たすべき役割について提言された。この提言に基づき、これまで各種の試行工事、施工管理要領の策定などを進めてきた。

b. ITが変える、私たちの暮らしー国土交通分野イノベーション推進大綱ー「国土交通分野イノベーション推進本部」

2007 年 5 月に国土交通分野イノベーション推進本部によって、ITを国民生活や経済社会活動に密着する国土交通分野に最大限に活用するための共通基盤の構築や重点プロジェクト、将来像と今後の戦略が示された。この中で、「社会資本整備・管理の効率化、生産性の向上」の観点から、情報化施工を推進している。

c. 国土交通省 CALS/EC(Continuous Acquisition and Life-cycle Supports/Electronic Commerce: 公共事業支援統合情報システム)アクションプログラム

CALS/EC は、組織間、事業段階間で情報の交換、共有、連携を図り、コスト縮減、品質確保、事業の効率化を目指すものであり、1996 年度の「建設 CALS 整備基本構想」の策定以降、アクションプログラムの策定・改定を行いつつ、各種の取り組みが進められている。

現在、3次元情報の利用に向けた検討が進められており、施工における設計情報の活用や維持管理への施工情報の提供等、3次元情報の流通に向けて、情報化施工への期待が高まっている。

(2) 国土交通省における研究開発等

a. ロボット等によるIT施工システムの開発

国土交通省総合技術開発プロジェクトとして、2003年度から2007年度の5ヵ年計画で、ロボット等によるIT施工システムの研究開発が進められてきた。建設現場における劣悪な作業環境の改善と安全性確保、今後の若年労働力不足や熟練者不足等への対応を目的に、ITとロボット技術を活用した油圧ショベル等のロボット建設機械を開発した。

b. 建設技術研究開発助成制度

国土交通省では、2001年度より、建設以外の他分野を含めた広範な学際領域における建設技術革新を促進し、それらの成果を公共事業等で活用することを目的に、実社会での波及効果の大きい建設技術研究開発課題に対して公募し、民間の研究者等に研究開発費の補助を行っている。

特に2008年度には、従来の「基礎・応用研究開発公募」、「実用化研究開発公募」に加えて新設した「政策課題解決型技術開発公募」において、「(調査・計画、設計、施工、維持管理を包含する)建設生産システムの生産性向上に関する技術開発」をテーマのひとつに掲げ、情報化施工の活用に向けた研究課題の早期解決を積極的に目指している。

3.3.2 海外における最近の取り組み

(1) 推進計画等

米国の道路事業では、FHWA(Federal Highway Administration:連邦高速道路管理局)やAASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials:米国全州道路交通行政官協会)において、情報化施工の推進に向けたプランが策定されており、マシンコントロールシステムや面的な施工管理に対する関心が高まっている。

a.Intelligent Compaction Strategic Plan (FHWA:2005)

2002年以降、Intelligent Compactionに関する調査検討が進められ、2005年にはFHWAの戦略計画が策定されている。Intelligent Compactionとは、締固め作業中に、計測された地盤反力に応じて締固めの加振力を制御し、それらを計測できる振動ローラを用いて、強度、締固め回数を高精度な位置計測結果とともに連続的に計測し、帳票として出力するものである。これにより、舗装の締固め管理において、従来の点的な管理から面的な管理・検査へと移行し、品質の均一性向上と検査の省力化を目指している。

また、本計画では、短期・長期のゴールが設定されている。短期的には基礎実験・デモ工事・機器仕様の改良などであり、長期的ゴールとして、2008年5月までに、ばらつきの評価方

法と AASHTO における標準的な施工手順としての登録, 2009 年 5 月までに, Intelligent Compaction を用いた土, 粒状路盤, アスファルト, コンクリートについて AASHTO の施工仕様書として完成させる予定となっている。

b. Automated Machine Guidance(AMG)の普及計画(AASHTO:2007)

表 3.2 に示すように, AASHTO による AMG の普及計画が策定され, 米国内で利用が進んでいるマシンコントロールおよびマシンガイダンスシステムの普及に向け, 広報, 技術指導の実施, 教育体制の確立, 地形データや設計データの有効活用や標準の策定が計画されている。計画では, 2010 年までに実施する表 3.2 に示す7つのタスクを設定し現在, 活動が進められている。

表 3.2 AASHTO TIG* Lead States Team Marketing Plan for AMG(AMG普及計画)

No.	タスク(Task)	説明(Description)
1	主要メンバーの選定	AMG 施工の仕様策定に向けた州政府の主要メンバーの説得を行う
2	改良ベンダーへのオファー	州政府のニーズにこたえることができるベンダーとのコネクションづくりを行う
3	AMG を使用する州政府について	技術推進プロジェクトの前後において導入した各州の活動を慎重に評価し, ある程度活動が拡大するまで実施する
4	AMG を使用する施工業者について	技術推進プロジェクトの前後において導入した施工業者を慎重に評価し, ある程度活動が拡大するまで実施する
5	データ標準の導入	州業務の効率化支援と AMG 施工の一貫したデータ集積プロセス(data collection process)のために XML(Extensible Markup Language)データ標準を導入する。また, データ標準の普及促進や著作権の保護も行う。上記については, 米国全州道路交通運輸行政官協会に協力を求める。AASHTO の公共部門の成果としてデータ標準をメンテナンスする
6	協力者への連絡	早急な承認を得るための支援や連携を求めるために関係団体や委員会との連絡窓口を設置する
7	全州への支援	AMG 施工によるパイプラインの計画や導入のための支援を実施する

TIG*: Technology Implementation Group

(2) 海外の導入事例

国内外で情報化施工を導入している施工企業や情報化施工機器を販売している建設機械メーカー, 測量機器メーカーによると, 近年, 海外(特に欧米)において, 情報化施工への関心が急速に高まっている。

民間調査会社の報告では, 米国における建設機械の販売台数のうち, グレーダでは約 3 割, ブルドーザでは約 1 割がマシンコントロールシステムに対応していること, また, 導入コスト(約 5 万ドル~7.5 万ドル)を最長でも 18 ヶ月間で回収していることが報告されている。

欧州においては, 東欧を中心にEU新規加入諸国での大規模プロジェクトが近年増加している。これらのプロジェクトに参加(落札)するために, 短い工期で確実な施工品質が実現でき

ること、また、北欧では極夜などの厳しい環境条件から短期間で高効率な施工が必要なことから、マシンコントロールシステムの導入が進んでいる。また、フランスやドイツ等では振動ローラによる締固め管理が既に施工管理手法として取り入れられているなど、従来の点的な施工管理から面的な施工管理への移行が積極的に進められている。

欧米以外の代表事例として、アルジェリアの北部で建設中のアルジェリア東西高速道路3工区中の1工区(400km)を、日本の建設会社が主体の共同企業体が総合評価方式の国際競争で受注した。土工事量約1億1,000万 m^3 という超大型工事ながら、設計を含めて40ヶ月という短期間で完成させることが条件であるため、ブルドーザやグレーダのマシンコントロール技術、GPSを用いた締固め機械の軌跡管理による面的な品質管理技術などの情報化施工技術が導入されている。

海外において情報化施工が普及している要因として、主に以下のような理由が考えられる。

a. 契約方式

米国では、工事の契約条項(工費・工期、品質・性能などを示す技術仕様)を満たすことを証明できる場合は、専門的知識を有するエンジニアの裁量で施工管理や監督を実施することが可能であることから、新しい施工管理技術が導入しやすい環境にある。

また、米国やカナダでは、工期の短縮や品質／性能の確保に対して報酬制度(またはペナルティ制度)があり、ICTを用いた高度な施工や施工管理を積極的に導入するインセンティブとなっている。

b. 発注規模

米国では、会計年度にかかわらず、プロジェクト完了に必要な期間を通しての契約が可能であるため、日本と比べて一工事の発注規模が大きく、使用する建設機械の稼働日数も長い。このため、情報化施工機器の導入にかかるイニシャルコストを、施工の効率化で早期に回収することが可能である。

c. 建設機械の保有形態

米国では、施工企業が自ら建設機械を保有している場合も多い(日本では約6割がリースまたはレンタル)ため、施工業者のインハウスエンジニアが情報化施工のハードウェア・ソフトウェアの取り扱いに習熟している。

d. GPS 補正情報の利用環境

ニューヨーク州では、州政府が施工企業に対してGPSの基準点(46点)を無償提供している例もあり、容易に高精度なGPSを利用できる環境が提供されている。

3.3.3 情報化施工導入の問題点

前述のように、情報化施工は海外において活発に導入されている。図 3.8 は情報化施工の代表的機器である建設機械マシンコントロール機器の販売比較である。マシンコントロール機

器がその全てではないが、我が国は欧米と比べて情報化施工の導入事例が少ないことを示している。その理由は、前項の a.～d.で述べた事項にあると考えられるが、情報化施工が建設生産性向上の切り札であるなら、積極的に普及を図ることが必要である。

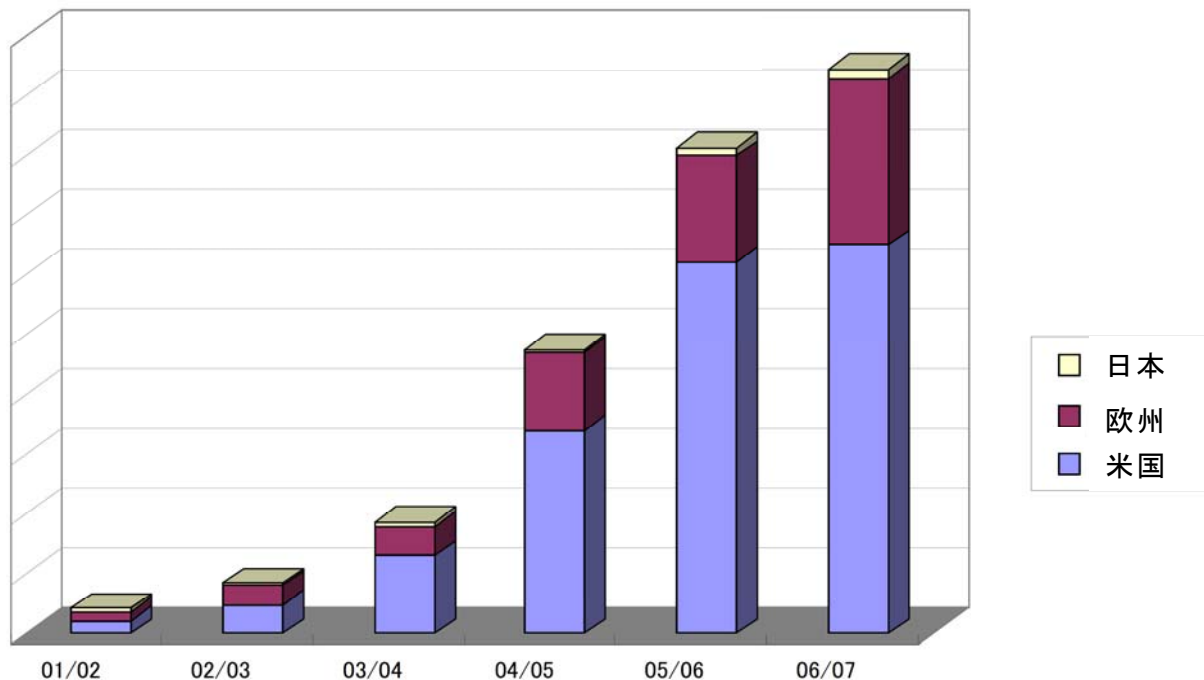


図 3.8 建設機械マシンコントロール機器の販売比較

現状では、我が国における導入を妨げている理由としては、以下のような理由が考えられる。

(1) 施工環境に関する理由

- ・ 施工規模が小さく、導入コストに見合わない
- ・ 工期短縮・品質向上が施工業者の直接的なメリットにつながらない
- ・ 従来方法でも施工が可能のため、導入意欲が湧かない

(2) 発注業界環境に関する理由

- ・ 施工管理を合理化しても監督・検査は従来通りのため、検査のために測量杭を設置することや、検査装置が別途用意することなどが要求され、メリットが低減してしまう

(3) 機材、他に関する理由

- ・ 機器導入コストが高い
- ・ 機材・装置を扱える技術者が不足している

これらの他、情報化施工を構成する技術の問題もまだ多くあると考えられる。また、海外とわが国の建設プロジェクトの推進体制や、請負形態の違いも影響していると考えられる。しかし、それらも含め、情報化施工によって『建設生産の変革』を目指すためには、上記問題点に整合

した情報化施工技術の開発が必要である。

これらの事項に関しては、6.2 項の情報化施工技術の展望で取り上げた。

[参考文献]

- 1) 「情報化施工推進戦略」, 情報化施工推進会議, p.3, 2008 年 7 月 31 日
- 2) 施工管理データを搭載したトータルステーションによる出来形管理要領(案)(道路土工編), 国土交通省, 2007 年
- 3) TS・GPSを用いた盛土の締固め情報化施工管理要領, 国土交通省, 2003 年
- 4) 建設業ハンドブック 2008, (社)日本土木工業協会, 2008 年
- 5) 公共工事の品質確保の促進に関する法律, 第 3 条第 2 項, 2005 年 3 月 31 日法律第 18 号
- 6) 公共工事における総合評価方式活用ガイドライン, p. i, 公共工事における総合評価方式活用検討委員会, 2005 年 9 月
- 7) 建設業労働災害防止協会(建災防)・労働災害統計ー建設業における死亡災害局別・月別発生状況(2003 年 4 月～2008 年 3 月)

4. 情報化施工システムの開発

4.1 はじめに

前章で示したように、コンピュータや通信技術などの情報化分野で急速な技術革新が進み、建設産業でもこれらの情報化技術を活用した合理的な生産システムの導入・普及の促進により、技術集約的産業へ、そしてより魅力的な産業へと変革していくことが期待されている。

国土交通省が設立した「情報化施工促進検討委員会」の定義では、情報化施工とは、情報化技術を建設施工に適用して、多様な情報の活用を図ることにより、施工の合理化をはかる生産システムとなっている。同時に、建設 CALS/EC (Continuous Acquisition and Life-cycle Supports/Electronic Commerce:公共事業支援統合情報システム)の取り組みとあわせ、調査、計画、設計、管理段階も含めた一連の流れの中での建設事業の効率化を期待して取り組まれているものとされている。また、国交省国土技術政策総合研究所が中心となり実施している施工の情報化と業務改善研究の中でも、情報化施工技術は、土木施工における受発注者間の情報共有を促進し、事業の効率化、コスト低減、品質向上を目指すものと位置付けられ、土木構造物の設計から完成後の維持・管理までの一貫した情報管理技術を確立するために不可欠な空間情報の取得利用技術の研究¹⁾がなされている。

このような背景の中で、筆者は、『情報化施工構築』の大前提となる施工分野における情報化施工システムの開発をわが国で最も早く手掛けた。その目的としては、建設工事費縮減、工期短縮等の生産性の向上や、安全性の向上、品質の向上、良好な作業環境の確保があったが、同時に、これらの活動を通して、将来にわたり、建設を魅力ある産業として展開・発展させるという目的意識の下で実施してきたと言っても過言ではない。

情報化施工技術を現実のものとするために必要な「施工情報」として3次元空間情報がある。逆にいえば、ここで定義した情報化施工は、誰でも簡単に3次元の空間(位置)情報が獲得できるITの出現によりはじめて可能となる概念であり、その中核に GPS 技術が位置している。

現実的には情報化施工の導入現場で利用する GPS 形態はほとんどがリアルタイムキネマティック方式(RTK-GPS)である。この方式の特徴は、2章で述べたように、計測精度が20~30 mm, リアルタイム(標準で1秒間隔)で人や機械の3次元位置を知ることが出来ることにある。このため、測量をはじめ出来形、出来高数量、工事用機械の稼動状況の把握や、計画・設計データとの差異を迅速に知りフィードバックすることが必要となる情報化施工の要件に対して、欠くことのできない装置となっている。

本章では、本研究で開発し実現場に導入した情報化施工システムの概要及び、システムを構成する要素技術を示す。構成要素技術の一つに、GPS データを測量としてではなく、施工品質の評価データとして活用することを狙いとして独自に開発した『盛土締固め管理システム』があるが、その基本機能については本章でまとめ、開発時の課題と検討事項に関しては、次章で論じる。

4.2 大規模土工事における情報化施工システムの構築²⁾

GPS が建設業に導入されてから、おおよそ 25 年が経過している。この間、静止測量からはじまって DGPS、キネマティック測量、RTK-GPS と新しい GPS の機能が開発される毎に施工現場を中心にさまざまな応用が検討されてきた。

1994 年に開始された雲仙普賢岳復興工事では、建設機械の遠隔操縦によって土砂の掘削や、砂防ダムの建設を行う、いわゆる無人化施工が行われているが、ブルドーザ、ショベル、ダンプカーなどの建設機械の位置計測や出来形測量のために、初めて本格的に RTK-GPS が導入された。また、1995 年の阪神大震災後の港湾工事には、当時全国のすべての作業船が駆けつけたといわれたほど復旧工事が輻輳していたが、正確な測量基準点の設置もままならない状況で、作業船の位置出し、位置決めに使われたのが DGPS や RTK-GPS だった。それ以降、工事場所が衛星データの取得に最適な環境条件であることも手伝って GPS は海洋工事では標準的かつ不可欠な技術となっている。

このように GPS は、その性能の向上に伴って多くの局面で建設工事に適用されてきた。そのような背景の中、筆者は GPS の特長を全面的に活かし、施工の効率化、生産性の向上を目指して情報化施工システムを開発した。

4.2.1 工事概要と情報化施工システムの導入目的

GPS を利用した計測技術、省力化・自動化技術を統合した情報化施工システムを揚水発電所の上部ダム工事である、九州電力(株)小丸川発電所建設上部ダム工事(表面遮水壁型ロックフィルダム、総貯水量 620 万 m^3 、全掘削量 6,715,180 m^3)および北海道電力(株)京極発電所新設工事土木本工事(表面遮水壁型ロックフィルダム、総貯水量 440 万 m^3 、全掘削量 6,200,700 m^3)に導入した。図 4.1、4.2 に、小丸川発電所工事現場の施工中の状況を示す。



図 4.1 施工中の現場航空写真(小丸川発電所工事)



図 4.2 現場施工状況(小丸川発電所工事)

情報化施工システムの導入に際しては、両工事とも大土工量を短期間で扱う工事であることが最大の理由であるが、調整池の特異な形状(すり鉢状で曲面が多い)に対する施工精度の確保、広範囲の測量作業の効率化など、以下に示す事項を目的としている。

① 大土工における切盛り数量管理の的確化、効率化

掘削箇所が調整池内に点在するとともに原石山を有さないため掘削した岩石を廃棄岩と分別する必要があることや、掘削量が大規模であるため管理が膨大かつ複雑となる。

② 盛立て工事管理の的確化、効率化

盛立て箇所が調整池内に点在するとともに盛立てエリアが複雑な形状であることや、盛立て量が大規模であるため管理が膨大かつ複雑となる。

③ 調整池の斜面施工の効率化、品質確保

急斜面と曲面を組み合わせた形状となっている上部調整池の効率的な施工法として、斜面自走転圧方法を採用している。このため、表面アスファルトの下層部分(トランジション部)の仕上げ厚さ精度および品質(密度等)確保が課題となる。

④ 測量作業の効率化、迅速化

工事エリアが広く、地形が複雑であるとともに調整池内は切土・盛土が複雑に混在するため、日々の変化に対応できる地形測量や工事進捗に合致したタイムリーな丁張り設置測量などが重要となる。

4.2.2 情報化施工システムの構築と適用

当該現場で構築した情報化施工システムの現場機器構成、配置の概念を図 4.3 に、図 4.4 に実際の現場施工状況を示す。

当然のことながら、情報化施工現場といえども、すべての機械が自動で稼働しているわけで

はない。情報化施工現場では、現場における測量を迅速に行えることや、各建設機械(ブルドーザ、油圧ショベル、振動ローラ、重ダンプ)の運行監視や稼動状況を把握できる仕組みが備わっており、これらの機能自体、生産性や品質の向上に寄与するものであるが、それよりもこれらの技術によって、施工データがデジタルデータとして迅速に得られるようになったことが、情報化施工の実現に大きな役割を果たした。設計データのデジタル化が進む一方で、それと整合した施工データを獲得できたことによって、共通の3次元デジタルデータを用いた調査、設計、測量、施工、施工管理にわたる一連のシステムが完成した。

この情報化施工システムにおける情報の入手手段の中心的役割をGPSが果たしている。

図4.5に当該現場での主要な構成システムと施工管理システム全体の関連を示し、以下にシステムの構成技術を述べる。

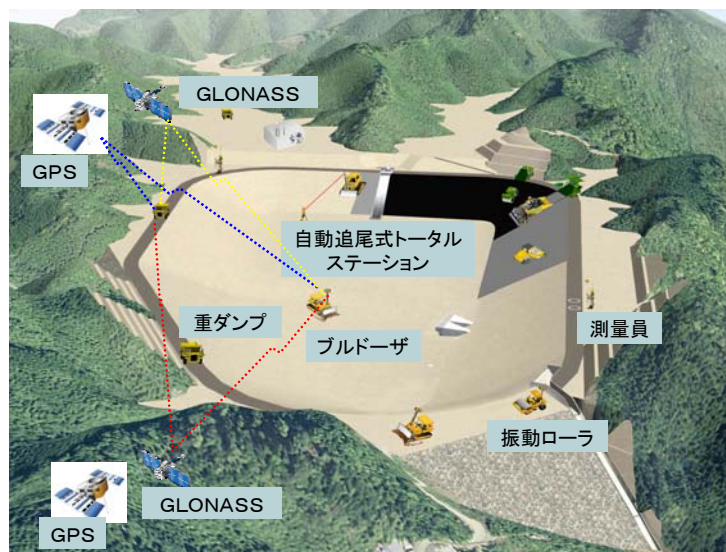


図 4.3 情報化施工システム概念図



図 4.4 現場施工状況

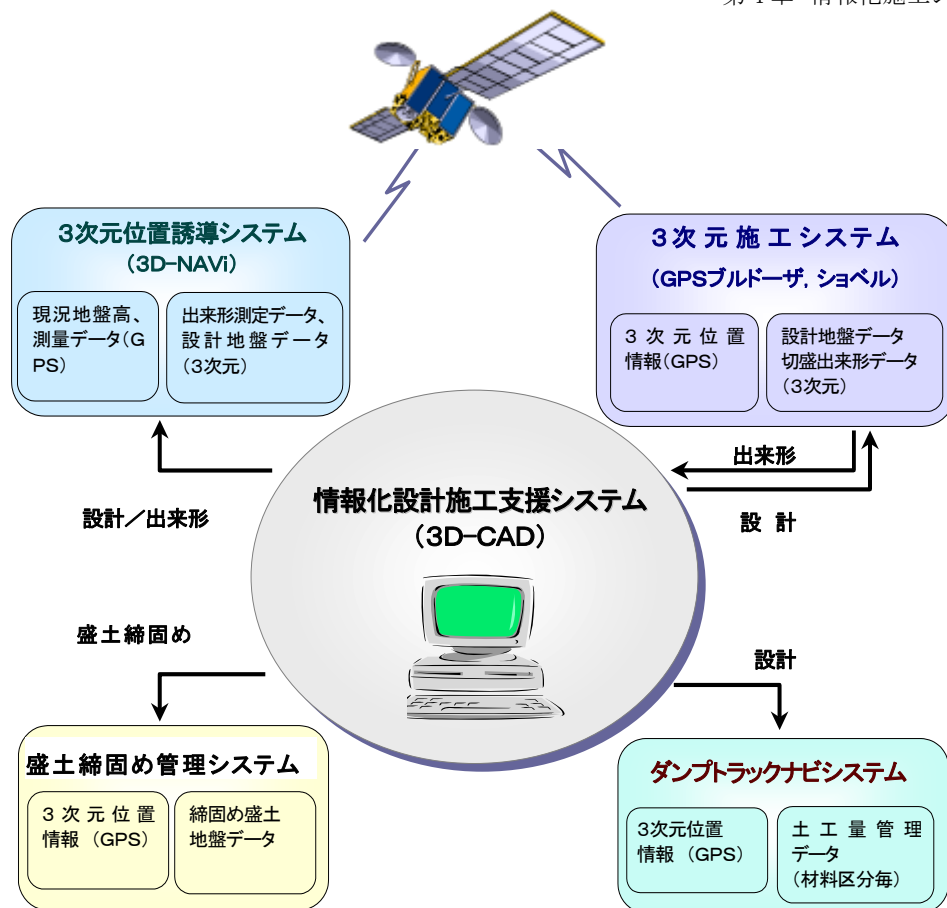


図 4.5 情報化施工システム

(1) 情報化設計施工支援システム (3D-CAD)

情報化施工では、施工に伴ない発生する計画変更等の情報を迅速に数値データとしてフィードバックする必要がある。このような設計・計画の変更、追加に必要な膨大なデータを処理するために、情報化設計施工支援システムを3次元図形処理技術によって構築し、大幅な省力化および高品質化を実現した。また、後述する各システムと設計データ、工事進行毎の測量データの共有によって、作業の自動化、省力化、および施工管理の効率化も図ることができた。本システムの特徴を以下に記す。

- ① 測量結果から地形図コンタを自動作図する。
- ② ダムの他、付帯のトンネル、道路造成等の3次元作図ができる。
- ③ 土量、面積等の数量計算、帳票出力が自動で行える。
- ④ 出来形数量の自動作図、数量計算、帳票出力が行える。
- ⑤ 景観 CG が自動作図できる。図 4.6 に小丸川発電所、図 4.7 に京極発電所のそれぞれの着工前と完成時の CG を示す。

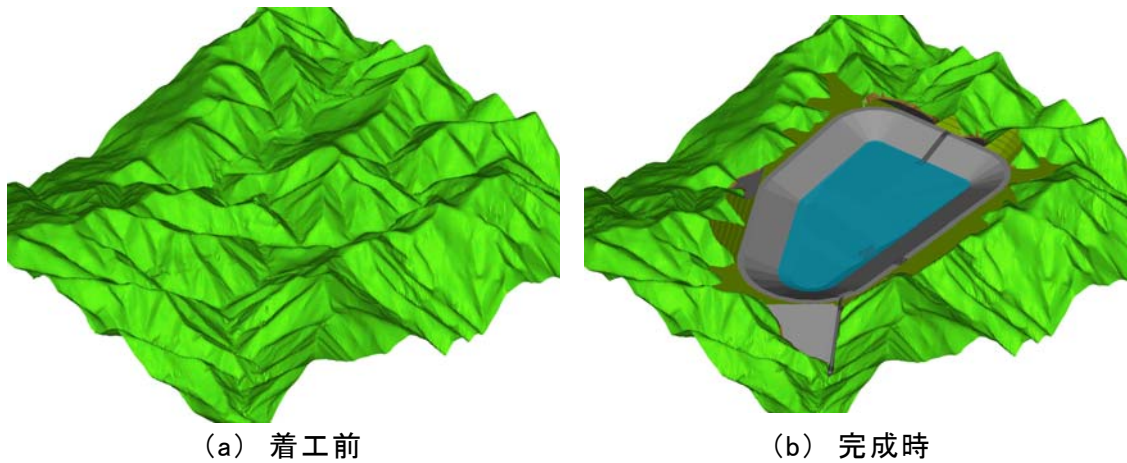


図 4.6 景観 CG(小丸川発電所上部調整池)

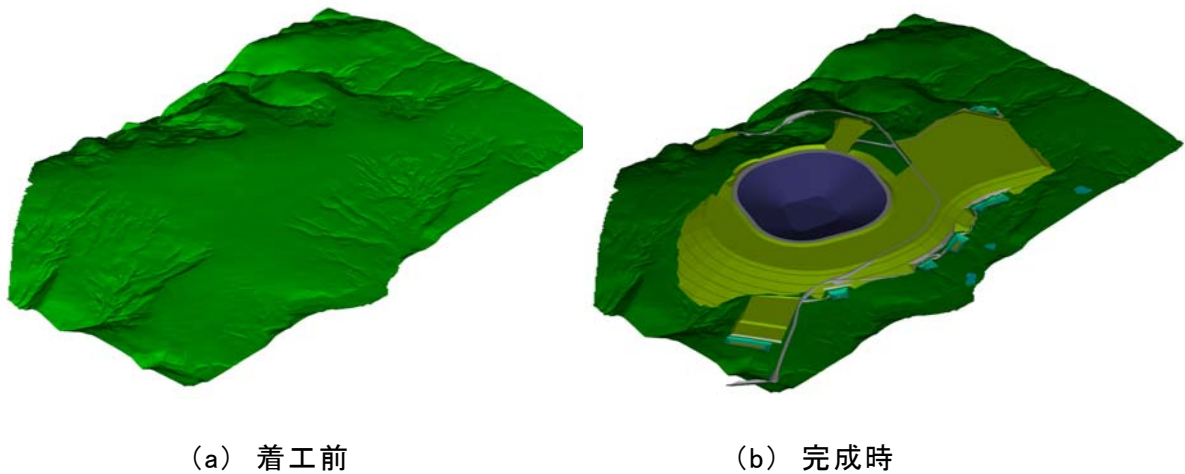


図 4.7 景観 CG(京極発電所上部調整池)

(2) RTK-GPS による測量位置誘導システム(3D-Navi)

本システムは、RTK-GPS をポジショニング機器として使用し、パソコンコンピュータにあらかじめ 3D-CAD 作成した3次元メッシュデータを登録し、設計データ上の位置を画面上で指示することで、測定者を指定した位置に誘導することができるシステムである。

RTK-GPS については、2 章で詳しく述べたが、ここで再度、図 4.8 に基本的な RTK-GPS の構成、配置を示し、RTK-GPS 測量の特徴を記す。

- ① 従来の光学測量で必要とされる測点と器械との視通が必要なく、場所によらず自由に地形の3次元座標測定ができる。
- ② ただし、測点である移動局は基準局からの衛星観測データの通信がつながっていることが必要である。通信が途絶した場合は精度確保が困難になり測量データとして採用できない。通信メディアによっては通信距離や利用可能範囲に制約がある場合がある。例えば、特定小電力無線では通信距離が数百 m に限られている。また、最近は携帯電話が利用

される場合が多いが、山間部ではサービスエリア外となっている場合も多い。今回導入した現場は図 4.1 に示すような山岳地帯であることから、業務用無線を利用した。これは陸上特殊無線局の免許を取得して使用が許可されるもので、伝送距離 1～4km の移動体通信に適した UHF 帯 (373MHz) の周波数で 5W の送信出力を持つ。データ伝送用のアンテナは、図 4.9 に示すように、現場のほぼ中心に位置する現場事務所の屋根に設置している。これにより施工エリア全域にわたり無線データ伝送を可能としている。

- ③ GPS 衛星を常時 5～6 基以上安定して観測できる受信環境であることが必要である。RTK-GPS の稼動には基本的に 5 個以上の衛星から電波受信することが必要である。建設機械搭載の場合など実際には移動しながら観測するので GPS アンテナの傾きや周辺の障害物によって衛星電波が遮断されることも考慮すれば、実際には 6 個以上の衛星が観測できる場所を選んで運用することが必要であり、現場導入に際しては GPS の利用環境の調査が重要となる。

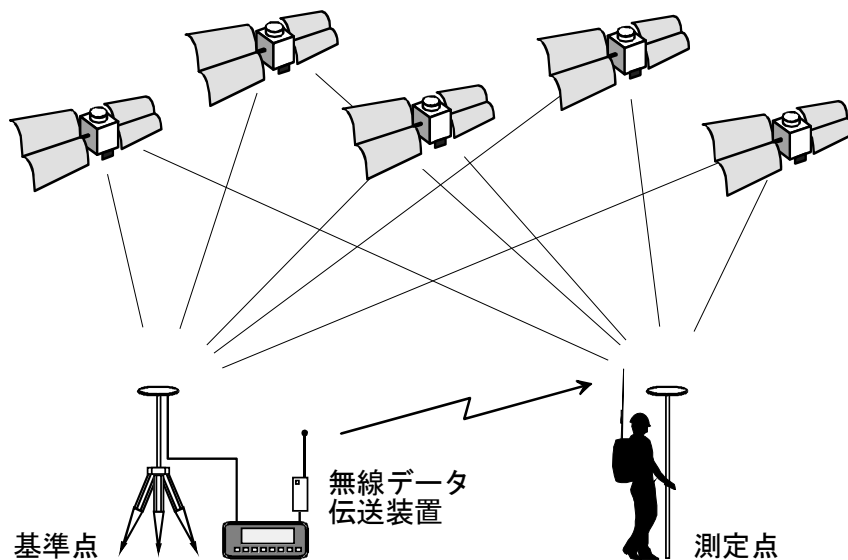


図 4.8 RTK-GPS 測量システムの構成



図 4.9 RTK-GPS 基準点

このような特徴をもつ RTK-GPS を利用した、3D-Navi の最大の特徴は、この基本機能を利用して法面の切出し位置や盛立て位置への誘導を簡便・迅速に行うことができることである。

図 4.10 に 3D-Navi(RTK - GPS)による測定状況を、図 4.11 に 3D-Navi による杭設置(丁張り)作業例を示す。

主な機能は以下のとおりである。

- ① 進行方向へのペンタイプコンピュータ画面回転機能(常に進行方向へ正対)
- ② 音声ガイダンス誘導機能
- ③ 「標高差測定」は設計面と現在位置の標高差の測定(図 4.12)
- ④ 「ポイント誘導」は指定点への位置誘導(図 4.13)
- ⑤ 「法杭誘導」は法面盛立て・切出し位置への誘導(図 4.14)
- ⑥ 「方向杭誘導」は方向杭設置位置への誘導(図 4.15)
- ⑦ 「座標差測定」は登録点と現在位置の座標差の測定
- ⑧ 「出来形測定」は自動測定機能による連続測定



図 4.10 3D-Navi による測量作業



図 4.11 3D-Navi による杭誘導(丁張り)作業

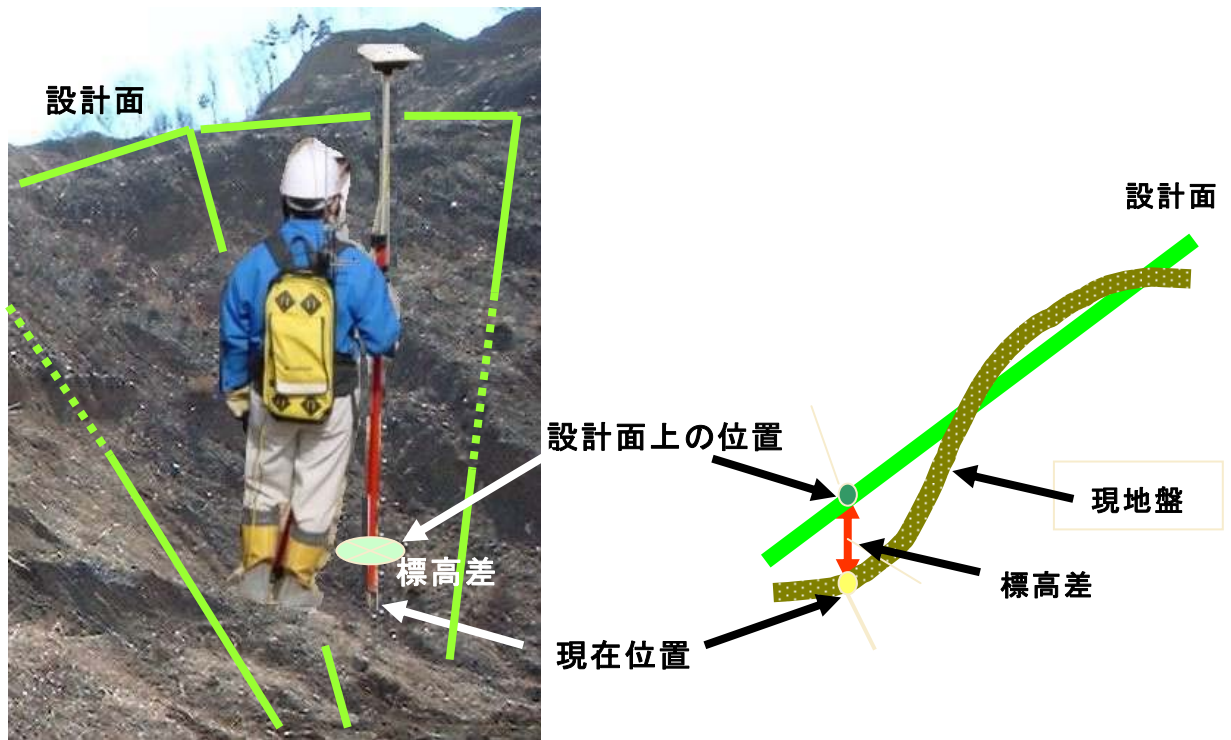


図 4.12 標高差測定概念



図 4.13 ポイント誘導概念

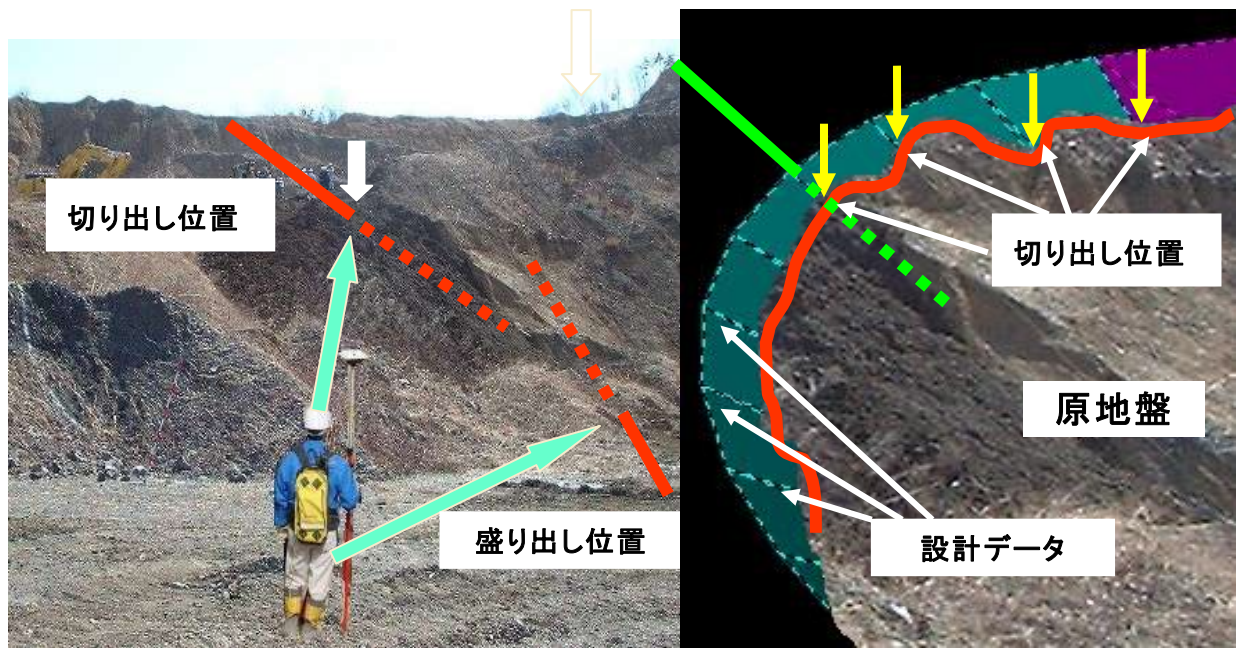


図 4.14 法杭誘導概念 (ジャストポイントな切り・盛り位置への誘導)

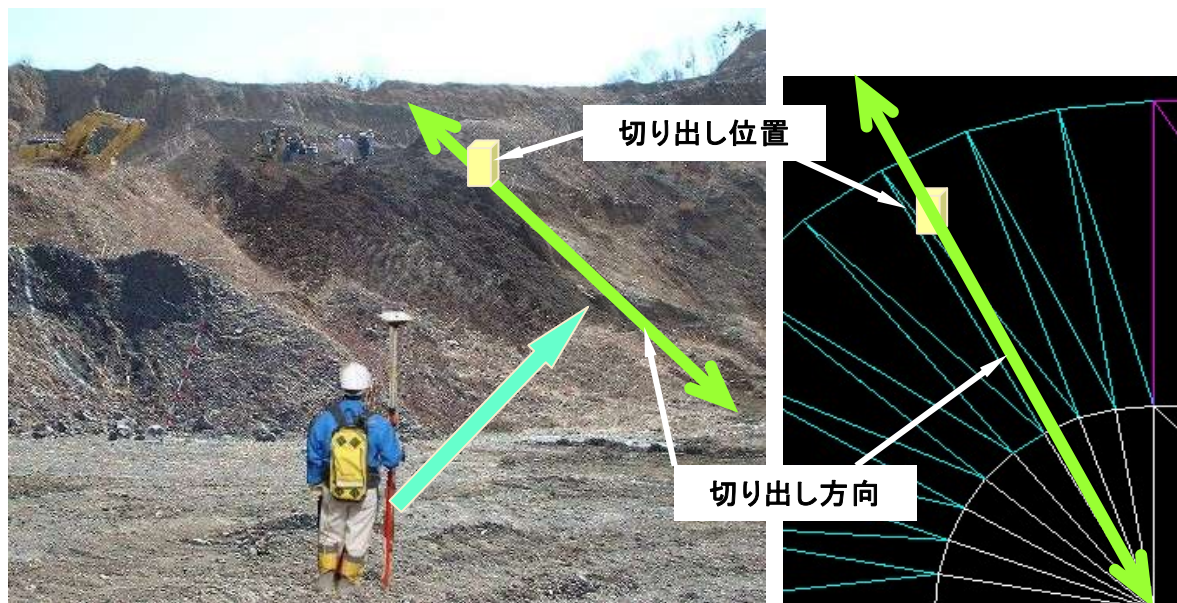


図 4.15 方向杭誘導概念 (方向杭設置位置)

(3) 3次元施工システム(3D-MC)

本システムは、3次元設計データとRTK-GPSによって測定された重機の位置情報をリアルタイムに照合させ、設計データどおりに油圧をコントロールし建設機械の走行、位置決め、ブレードやバケット等の自動制御を行うシステムである。

これにより従来、種々の工程を踏まえて行われてきた丁張り等の作業を省力化し、かつより高い精度で効率的な施工を実現できるようになった。

現場ではシステムをブルドーザと油圧ショベルに導入しているが、以下に機種ごとのシステムの概要を述べる。

a. 3次元施工ブルドーザ

本システムは、リアルタイムでブルドーザのブレード底部の X, Y, Z 座標を計測しながら3次元 CAD 設計データを基にして施工するシステムである。

i) システムの特徴

- ① 図 4.16 に示すように GPS アンテナ、傾斜センサから構成され、ブレード底部の X, Y 座標測位精度は±30 mm程度、Z 座標測位精度は±50 mm程度(対象機械:21t 級ブルドーザ)で常時計測されている。
- ② オペレータはコンピュータ画面に表示される3次元設計 CAD データを基にした誘導、指示情報に従って施工を行うことで、丁張りやトンボの必要なく掘削や敷均しが可能である。
- ③ 縦断、横断勾配が存在しても、傾斜センサがブレードに搭載されているため、設計どおりの施工が可能である。

ii) システムの運用

一般的な土工事の管理基準値が適用される場合は RTK-GPS を使用しているが、アスファルトフェーシングの施工基盤(水工フォームドアスファルト混合物 厚さ 15 cm)など 10 mm以下の厳密な厚さ管理が必要な箇所については、±数 10 mm程度である RTK-GPS の精度では不足するため、ブレード上部に反射プリズムを設置して、そのプリズムの3次元位置を自動追尾式トータルステーション(TS:距離精度 $\pm(5\text{ mm} + \text{距離(km)} \times 10\text{ ppm})$ 、測角精度 $15''$ 以下)によって計測している。TS は GPS よりも高精度が得られる反面、プリズムを見通せる施工箇所の近傍に三脚を据付ける必要がある点、建機それぞれに 1 台ずつ自動追尾式 TS が必要な点、および操作性などに課題もあり、GPS ほどの簡便さはない。

ブレードが電磁バルブの開閉によって自動制御されているため、オペレータは対象となる施工エリアの3次元メッシュの設計データを選択し、前後進操作を行うだけで高精度な施工を行うことが可能である。

施工状況を図 4.17, 18 に、車載コンピュータ画面を図 4.19 に示す。ブレード高さを走行位置に応じて自動制御するため、例えば、図 4.18 のように一定勾配の途中から曲面状に変化する形状の敷均しも、オペレータはブルドーザの前後進操作を行うだけである。

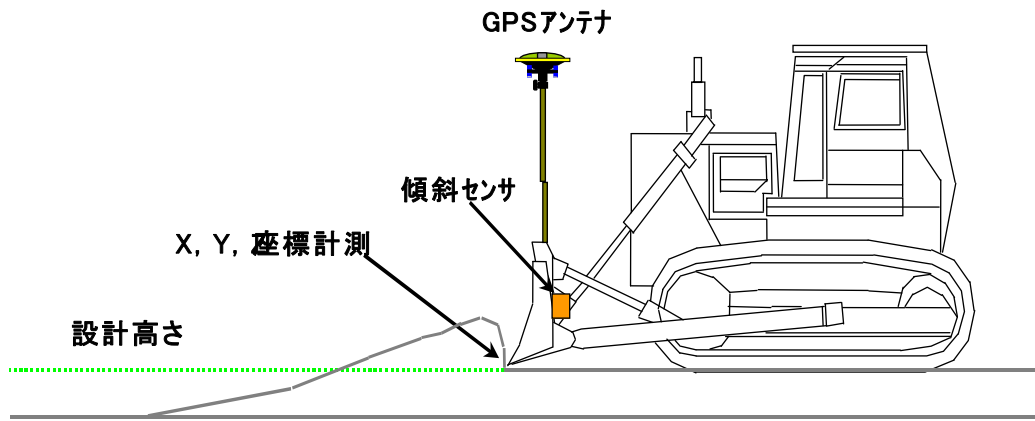


図 4.16 3次元施工ブルドーザ



盛土敷均し状況

図 4.17 3次元施工ブルドーザ施工状況(1)



図 4.18 3次元施工ブルドーザ施工状況(2)

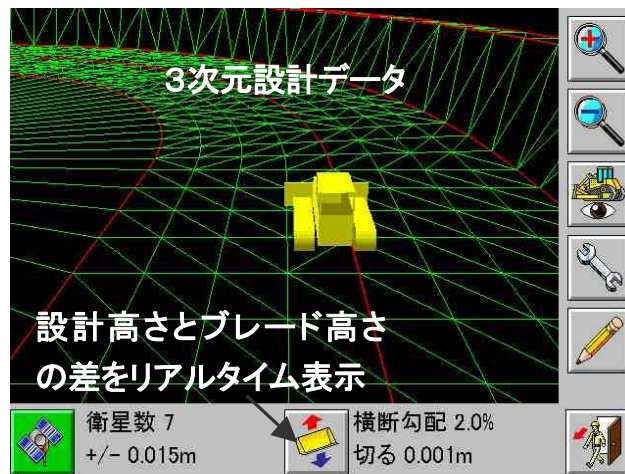


図 4.19 位置誘導，施工情報表示画面

b. 3次元施工油圧ショベル

本システムは，リアルタイムで油圧ショベルのバケット刃先の X, Y, Z 座標を計測しながら，3次元 CAD 設計データを基にして施工するシステム³⁾である。

i) システムの特徴

- ① 図 4.20 に示すように車体の位置と共にバケットの方向を計測するためのツイン GPS アンテナ，ロータリーセンサ，傾斜センサから構成され，バケットの刃先先端の X, Y 座標測位精度は±50 mm程度，Z 座標測位精度は±80 mm程度(対象機械:1.0m³ 級油圧ショベル)で常時計測可能である。
- ② オペレータはコンピュータ画面に表示される3次元設計 CAD データを基にした誘導，掘削指示情報に従って施工を行うため，丁張りの必要なく掘削や土砂整形が可能となる。
- ③ 縦断，横断勾配が存在しても，油圧ショベル本体に傾斜センサが設置されているため，機械の姿勢状態にかかわらず，常にバケット刃先先端の座標を高精度で把握可能である。

ii) システム運用

実施工では，油圧ショベルを所定の位置まで誘導することができ，バケットが設計法面の切出し位置や法面に対する位置を運転席の専用コンピュータに表示することにより曲線でも丁張りをほとんど設置することなく作業することが可能である。

オペレータは常に出来形状況を把握しながら施工が可能のため，手戻り，手直しのない合理的な施工が実施可能である。施工状況を図 4.21 に示す。

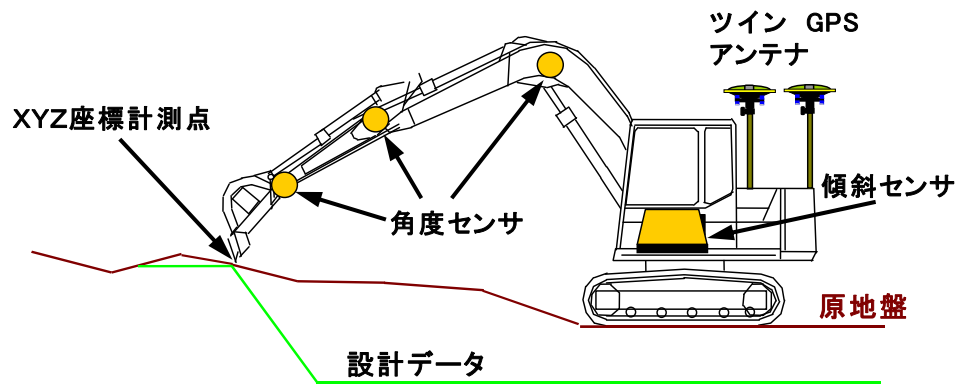


図 4.20 3次元施工ショベル



図 4.21 3次元施工油圧ショベル施工状況
(丁張りなしでの法切り作業)

(4) ダンプトラックナビシステム

多数の切土場から発生する岩級区分別のロック材や表土などの廃棄土を盛立て場、土捨場に運搬する46ton級重ダンプの運行管理を行うシステムである。重ダンプに設置したGPSの測位データを現場内の管理室に伝送することにより、どの切土場から搬出してどの盛土場へ搬入したかを自動的に記録し、積載材料の情報、切土場からの出発信号や盛土場での荷降ろし信号も同時に伝送するため、材料毎の搬出・搬入数量がリアルタイムで把握できるとともに、1日の作業数量が簡単に出力できる。

京極発電所工事では、ダンプトラックの運転手全員にCF(Compact-Flash)カードを配布し、キャビン内に搭載したPDA(Personal Digital Assistants)装置に入力することで、土質、切土場、盛土場別の運搬データを収集している。1日の作業終了時にはCFカードを回収し、事務所PCで自動集計処理して、土質、切土場、盛土場別の運搬回数結果を一覧表およびグラフ化することが可能である。ダンプトラックに搭載されたGPS機器、およびPDA画面を図4.22、4.23に示す。



図 4.22 重ダンプへの GPS 他機器設置状況



図 4.23 ダンプトラック搭載の PDA

(5) 盛土締固め管理システム

RTK-GPSによる測位データを用いて盛土の締固め回数を設定したメッシュごとに管理するものである。あらかじめ盛土エリアをメッシュで設定し、規定回数締固めたか否かを振動ローラの走行軌跡を分析して色分けして判定する。このシステムの特徴は、運転室内のパソコン画面上にGPSによって計測された振動ローラの移動軌跡から算出した盛土の締固め回数を表示することで、盛土の品質管理を行いながら施工できることにある。また、1台の振動ローラで複数箇所の締固め作業を同時に行う場合でも、個々の場所での締固め回数を記憶しているため、規定回数の施工を確保できる。図4.24に計測機器を搭載した振動ローラ、図4.25に盛土締固め中の車載PCの表示画面例を示す。

本システムは、他の情報化施工システムがGPS等を測量機、位置計測機器として活用し、現場の測量や建設機械の制御を対象とし、主に造成現場の出来形計測、整形に供されているのに対し、締固め機械の稼動状況を把握することによって、盛土の物性、品質を確保しようとするものである。今日、出来形の計測管理システムは、GPSの保有国である米国を始め多くの国々で実施されてきているが、筆者が開発した本システムの持つ、形のみならず物性における品質管理にまでに応用できることを示したことによって、日本特有の情報化施工システムの発展に繋がったといっても過言ではないと考える。すなわち、GPSをはじめ今日情報化施工に取り込まれているIT機器を、単に位置計測技術として捉えただけでは締固め管理システムは誕生することは無かったといって良く、このシステムの開発の経緯はわが国の情報化施工技術の発展に大きく影響していると考えられる。

本システム開発上には多くの問題、課題があったが、これに関しては次章で議論することとし、本項では開発したシステムの基本機能について述べる。



図 4.24 GPS 等計測機器を設置した振動ローラ

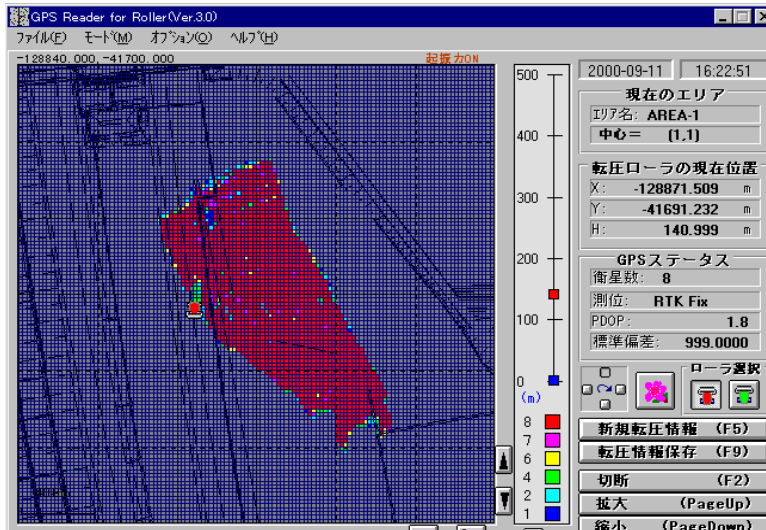


図 4.25 締固め作業中の表示画面

(6) 堤体基盤管理システム

本システムは、土砂地盤に対して、堤体基盤面の強度を短時間で簡易に把握するため、油圧ショベルに大型コーン貫入装置を装着し、基盤面の所定の位置で強度試験を行うものである。試験データは油圧ショベルに装備された専用表示器にリアルタイムで表示され、即時に基盤強度が確認できる。また、油圧ショベルに設置した GPS により装置の3次元位置情報を得て、所定計測地点に容易に位置決めさせることができる。試験結果から解析ソフトにより品質管理図の作成が可能である。コーン貫入試験状況を図 4.26 に示す。



図 4.26 コーン貫入試験状況

4.2.3 大規模土工事における情報化施工のまとめ

本項で紹介した二つの現場での情報化施工システムは、最新の情報技術(IT)を取り入れ、調査－測量－施工－施工管理を一体として管理するものであり、その導入によって以下のような技術的、経済的効果を生み出した。

(1) 技術的効果

- ①出来形図の自動作成、土量、面積等の自動数量計算が可能となった。
- ②盛立て位置、切出し位置を現場で現況地形を認識しながら自動的に表示でき、また、丁張りを設置することなく施工可能なため、大規模な土工事にもかかわらず少人数での現場管理が可能となった。
- ③重機土工工事における多大な省力化・省人化と高い施工精度を確保することが可能となった。
- ④面的な管理が可能となり、各層毎のトレーサビリティを保証することが可能となった。
- ⑤出来形の数量計算および出来形図の作成が迅速になり、土工事における運搬計画、土量変化率の算定を迅速に行うことが可能となった。
- ⑥土量計算、出来形図、施工管理図等の電子納品が設計および施工からの一連の流れの中で可能になる。
- ⑦本システムで得た施工データは、出来形データは勿論、各試験データにも現場座標系での正確な3次元位置情報が付加されているため、完成後、供用期間中の形状や各種物性値の経年変化など、維持、管理業務に効果的に活用することができる。
- ⑧オペレータの技量に左右されない仕上がり精度を確保することが出来た。

(2) 経済的効果

本システムは複数の技術が組み合わさることで、より一層の効果が得られる構成となっているが、施工の合理化・省力化・情報の一元化が大きな導入目的となっており、定量的な経済効果を表すことは難しい。しかし、システムは導入後数年が経過する中で、様々な改良や開発を行った結果、実用的なシステムの域に達し、施工の合理化・省力化に結実するだけでなく、他現場への水平展開にも大きく貢献している。

なお、システム導入によりコストダウン効果のあった各点は以下の内容になる。

- ①盛立て位置、切出し位置を現場で現況地形を認識しながら自動的に表示できるので、測量のための内業および測量作業自体が大幅に削減できた。
- ②急な設計変更などにも、最新の3次元設計データをオペレータに渡すだけで、施工用の丁張り設置や測量といった作業を実施することなく、施工することが可能となり、手戻り・手直しなどが大幅に減少した。
- ③夜間作業でも昼間と同程度の施工精度を確保しながら効率良い重機土工を実施することが出来た。

情報化施工システムを導入している工事では、本節で紹介したように工事管理データの一元化として CAD などを用いてデータ管理を行っている。これまで、個々のデータとして管理、保管されていたものを一元化することで、より高度な管理を実現している。

最近では GIS の導入も実施されつつある。これは、事前の調査・設計データ、今回紹介した GPS 測量データや形状データを中心とした施工・計測データ等を GIS により管理しようというものである。将来的には、GIS の活用により調査・設計、工事、維持管理までの一貫した工事管理システムへと発展させて行くことを検討している。また、これら施工データの標準化⁴⁾の検討も鋭意進めている状況である。

しかしながら、本節で紹介した情報化施工システムはまだ、大規模な施工現場でしか導入されていない。その原因はいくつかあると考えられるが、GPS を始めとする高価な電子機器や装置を数多く用い、建設機械を改造し、システム管理ソフト他の開発が必要であるなど、本文中で紹介したシステムから容易に推測されるように、システム構築までに多大な費用が必要であることが最も大きな要因であると考えられる。また、これまでは施工会社毎に研究開発してシステム開発を行い現場に適用することが多く、データフォーマットの統一や、表示法などが独自のものとなっていた。現在、国交省を中心に情報化施工技術の標準化を目指した活動も行われており、今後の情報化施工技術の高度化の動きとともに、システムの簡易化、標準化による実績の蓄積が望まれるところである。

4.3 盛土締固め管理システムの開発

4.2.2-(5)項でも述べたが、本システムは他の情報化施工システムの構成技術とは GPS データの活用方法が異なり、測量や形状計測機器として活用するのではなく、盛土自体の物性、品質を管理するために考案した技術である。

本技術は、筆者が 1996 年に試験的に実施したのを皮切りに、現在までに数多くの現場において稼動しているが、開発当初はそれまでの管理方法と大きく異なっていたため、適用に関しては、多くの課題、問題点が発生した。当然、機械装置の問題もあったが、施工時の問題や、管理側の考え方の問題も多く内在していた。現在では GPS 等の機械装置の問題点や、施工環境上の問題点、管理上の問題点がほぼ出揃い、それらを考慮した運用がなされているが、当初の次々と発生した課題及び、官民一体となって一つ一つ乗り越えて最終的に導入に至った経緯は、その後の情報化施工技術の構築に多大な影響を与えた。

本節では、情報化施工システムのさきがけとなった締固め管理システムの開発背景、と現場導入時検討項目を記す。

なお、現場適用時に実施した研究課題及び、システムの実用化、高度化に対する研究開発課題については、次章でまとめて示すことにする。

4.3.1 開発背景と締固め管理システム導入時の検討

旧日本道路公団の施工要領をはじめとする、従来の盛土品質管理手法は、「品質規定方式」と「工法規定方式」とに大別された。しかし、いずれの方式においても、

- ・ 施工ヤード全体にわたる面的かつ連続的な管理が困難である
- ・ 第二東名・名神などの大規模高速道路盛土工事では、大型施工機械の導入により1日当りの施工量の増大・施工ヤードの広大化が進んでいるため、管理に多大な労力・時間が必要となる

などの問題があった。

このような背景から、高速道路建設工事における盛土の高品質化・施工管理の効率化を目標に、1997 年度～2000 年度にかけて、旧JH試験研究所と民間 11 社との間で「共同研究 土の締固め自動管理手法の実用化に関する研究」が実施され、その成果として「施工規定方式による施工管理要領(原案)」[2000 年 3 月]が作成された⁵⁾。

「施工規定方式」は、GPSを利用して求めた締固め機械の3次元位置データ(X, Y, Z座標)および時間データをもとに、転圧回数・施工層厚・走行速度などの施工状況をリアルタイムで把握し、現場転圧試験で決定された施工方法が施工ヤード全体にわたって履行されているかどうかを確認・管理するものである。そのため、現行の管理手法では困難であった施工ヤード全体にわたる面的かつ連続的な管理が可能となり、盛土の高品質化が図れることになる。さらに、施工状況の確認、すなわち施工管理はオペレータが直接行うことができ、管理帳票の自動出

力も可能であるため、施工管理の効率化・省力化も図れることになる。

しかし、「施工規定方式による施工管理要領(原案)」は、モデル施工等の理想的な施工条件下でのデータをもとに作成されたものであるため、実工事に適用するには、解決すべき課題・問題点も残されていた。そこで、2000年8月から第二東名・金谷トンネル西工事において「施工規定方式」をパイロット的に適用し「施工規定方式による施工管理要領(原案)」における課題・問題点の解決を図ることとした。

施工規定方式の適用に際して基本的な以下の項目についての検討・確認を行った。

- ① 締固め機械起振時にのみ締固め作業と認識するシステムの実用性の確認
- ② 複数の締固め機械同時稼働時におけるシステムの適用性の確認
- ③ 既施工箇所との境界(継ぎ目部)の処理など、特殊なケースにおけるシステムの適用性の確認

4.3.2 システム導入状況

(1) 盛土管理システムの構成

施工規定方式適用時におけるシステム構成、使用機器を図4.27、表4.1に示す。なお、適用期間中における移動局、すなわち振動ローラ台数は1～2台とした。

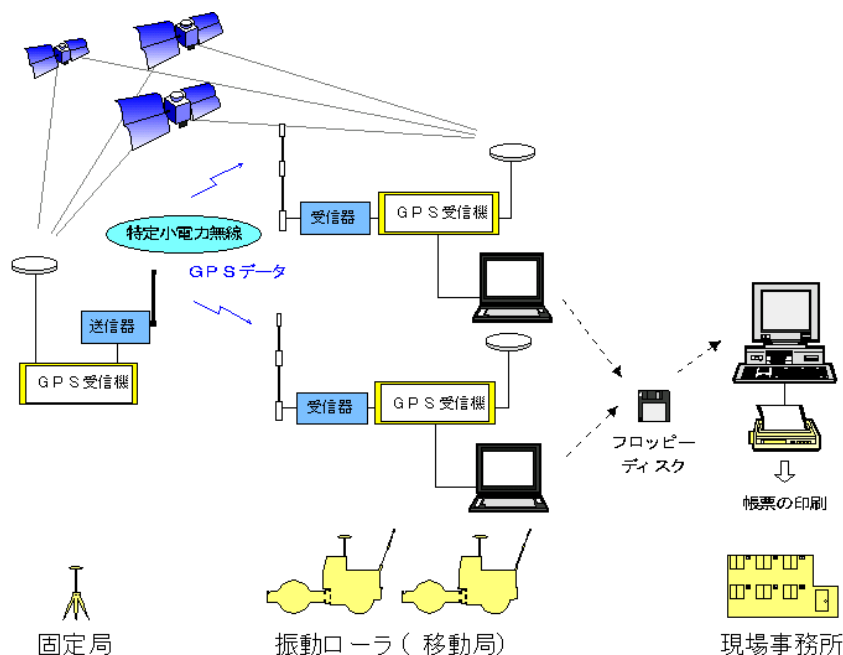


図 4.27 システム構成

表 4.1 使用機器一覧表

機 器 名	数 量	型 式 ・ 仕 様	摘 要
GPS 受信機	3 式	・RTK 方式 ・精度:水平 1-3cm, 鉛直 2-5cm ・TOPCON/Trimble 4400SSi	固定局(1), 振動ローラ(2)
無線モデム	2 式	1W 業務用無線	・固定局～振動ローラ間のデータ伝送用 ・送信機(1), 受信機(2)
車載用PC	2 台	東洋エレクトロ社製 Rocky	振動ローラ搭載用ノートパソコン
車載用機器収納箱	2 個	耐震・防水仕様	振動ローラ搭載機器の収納箱
車載用アンテナ治具	2 式	マグネットベース	振動ローラ GPS アンテナ用, 無線アンテナ用
車載用電源他雑材	2 式	DC/DC コンバータ他	振動ローラ搭載機器電源, 配線等
デスクトップPC	1 台	DOS/V モデル	現場事務所用・データ編集用
カラープリンタ	1 台	A4 出力	現場事務所用・帳票出力用
起振力動作検出器	2 式	近接センサ他	起振力レバー位置の検出

(2) 盛土品質管理方法

a. 施工規定方式適用区域

第二東名・金谷トンネル西工事区域において、事前に現地踏査を行って、盛土施工区域内における GPS データの受信状況を調査し、受信状況が良好な区域において施工規定方式を適用することとした。現地踏査による GPS データ受信状況調査結果を図 4.28 に、調査結果をもとに設定した施工規定方式適用区域を図 4.29 に示す。なお、施工規定方式の適用が困難であると判断された区域については、従来どおり RI による品質規定方式を適用することとした。

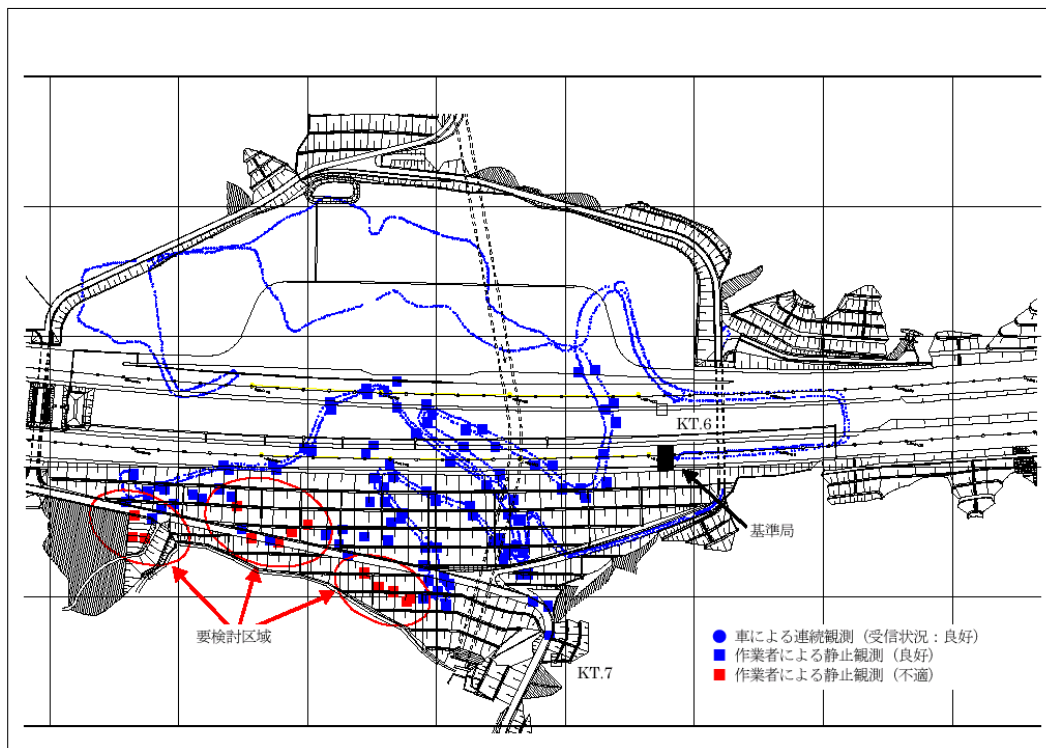


図 4.28 施工規定方式適用可能区域調査結果

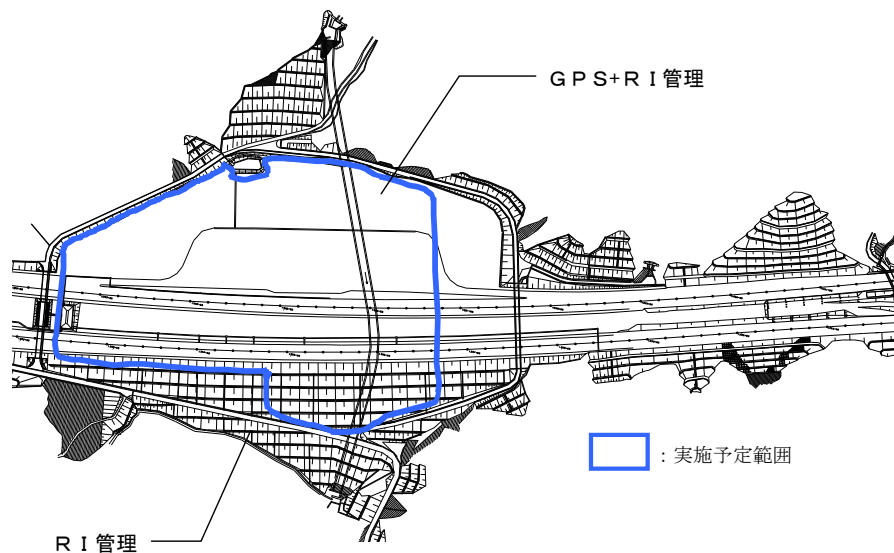


図 4.29 施工規定方式適用区域

b. 日常管理方法

今回の施工規定方式の適用はパイロット的なものであり、その適用性が確認されていないこと、管理基準値が明確にされていないことから、施工規定方式適用区域においてもRIによる品質規定方式を併用して、盛土の品質管理を行うこととした。

品質規定方式による締固め密度の測定頻度は、「土工施工管理要領」に従って、施工箇所一層ごとに15点とした。また、施工規定方式適用期間中に、人工衛星状況の悪化、固定局と移動局間の無線切断等によってGPSデータの欠落が生じた場合には、GPSデータ欠落時間の測定を行うこととした。

施工規定方式適用区域における日常管理項目・方法をまとめて表4.2に示す。

表 4.2 日常管理項目・方法一覧表

管 理 項 目	管 理 方 法	測 定 頻 度	備 考
密度比または空気間隙率	RI計器による土の密度試験 (JHS106)	施工箇所一層ごとに15点	管理基準値は「土工施工管理要領」に従って設定
施工箇所全面の転圧回数	GPS		GPSデータの欠落が生じた場合には、その時間も測定
施工箇所全面の施工層厚			
盛土材料の含水比	RI計器による土の密度試験 (JHS106)		盛土材料の変化の有無を把握するために測定 ⇒土工週報として提出

4.3.3 締固め管理システムの導入時検討結果

(1) 締固め作業自動認識装置の考案、設置

a. システムの概要・メカニズム

起振力操作レバーに近接スイッチを取付けて、起振動作位置にレバーがある場合のみ車載パソコンにデータを送信して、転圧判断を行うようなシステム構成と



図 4.30 締固め作業判定用装置

した。近接スイッチ設置状況を図 4.30 に転圧判断の図 4.31 に示す。

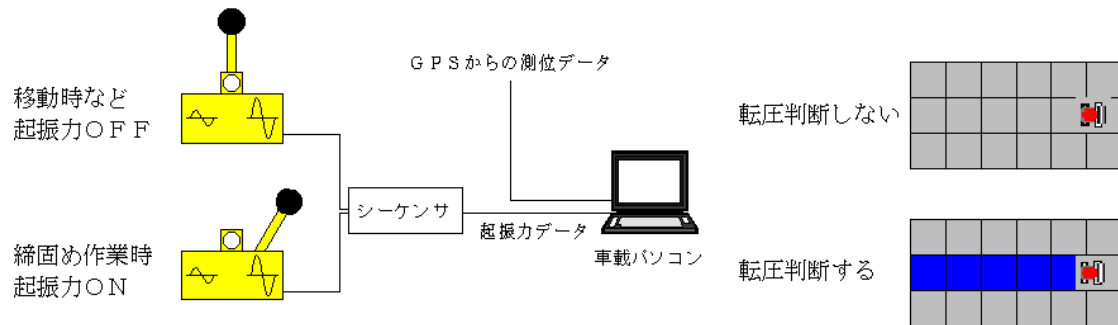


図 4.31 締固め作業の自動判定方法

b. システム適用例

締固め作業自動認識システムの稼働状況を確認するため、走行軌跡図(無振動時～振動時のデータ)と転圧回数色分図(振動時＝締固め作業自動認識システム稼働時のデータ)の例を図 4.32 に示す。

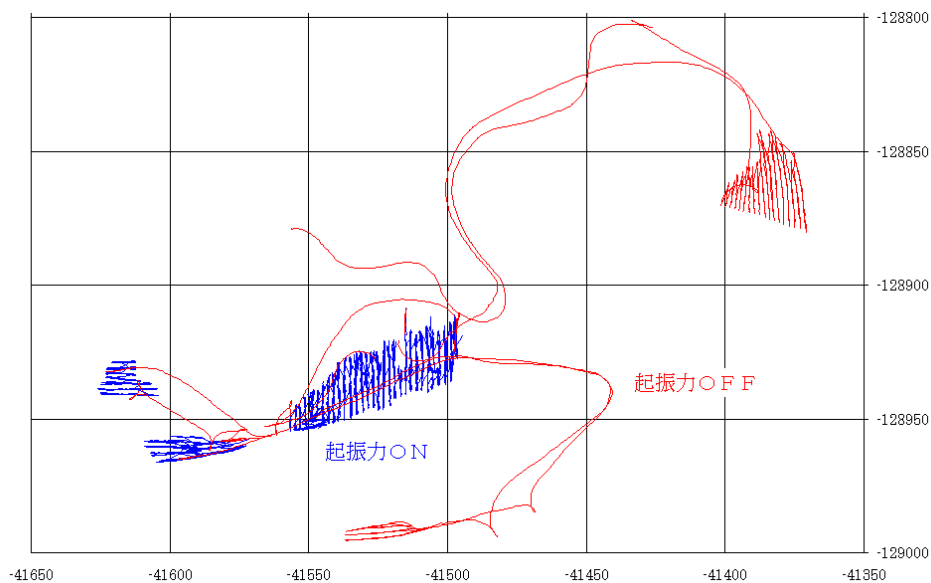


図 4.32 締固め作業と判定された走行軌跡図

(2) 複数の締固め機械同時稼働時におけるシステムの適用性確認結果

a. 処理の概要

各種帳票を次の3つのファイルを用いて処理を行うことが出来るようにした。

- 1) LOG(LOG ファイル)…締固め機械の走行軌跡データを格納
- 2) PRS(PRESS ファイル)…管理ブロックごとの転圧回数データを格納
- 3) LEV(LEV ファイル)…管理ブロックごとの標高データを格納
- 4) 各ファイルは後処理ソフトによって以下の流れで処理される。

- ① 複数の締固め機械から一日分の軌跡データを回収する。

- ② 後処理ソフトで、①のデータから新たに PRS ファイル・LEV ファイルをそれぞれの機械について作成する。
- ③ PRS ファイル・LEV ファイルをすべての機械について足し合わせる。
- ④ 合成された PRS ファイル・LEV ファイルが作成される。

図 4.33 に一連の処理の流れを示す。

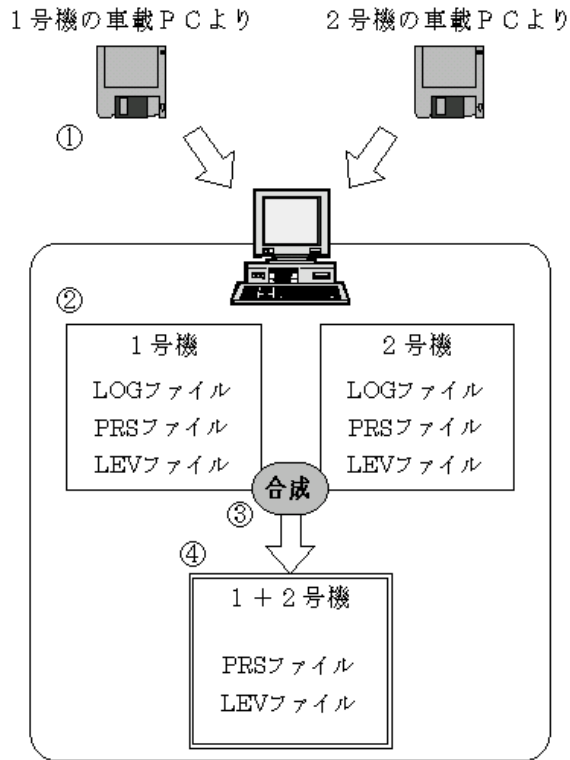
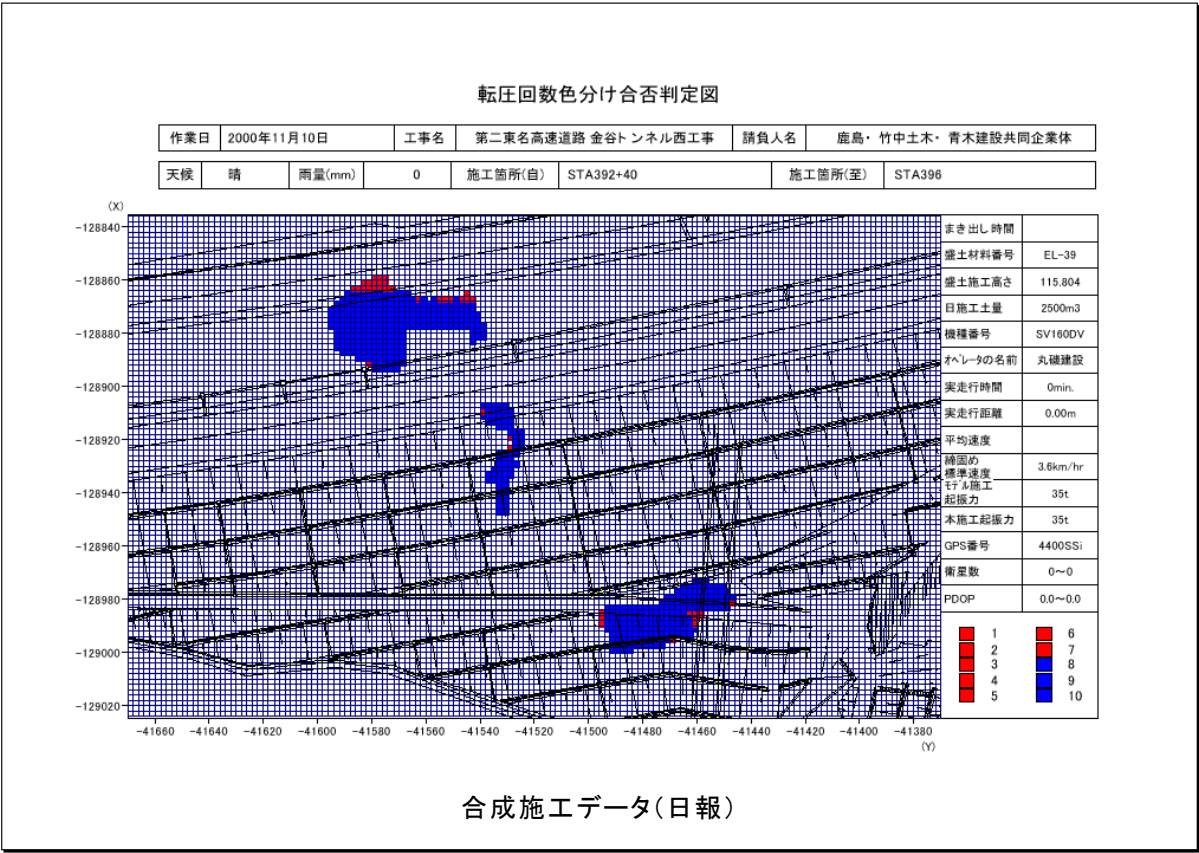
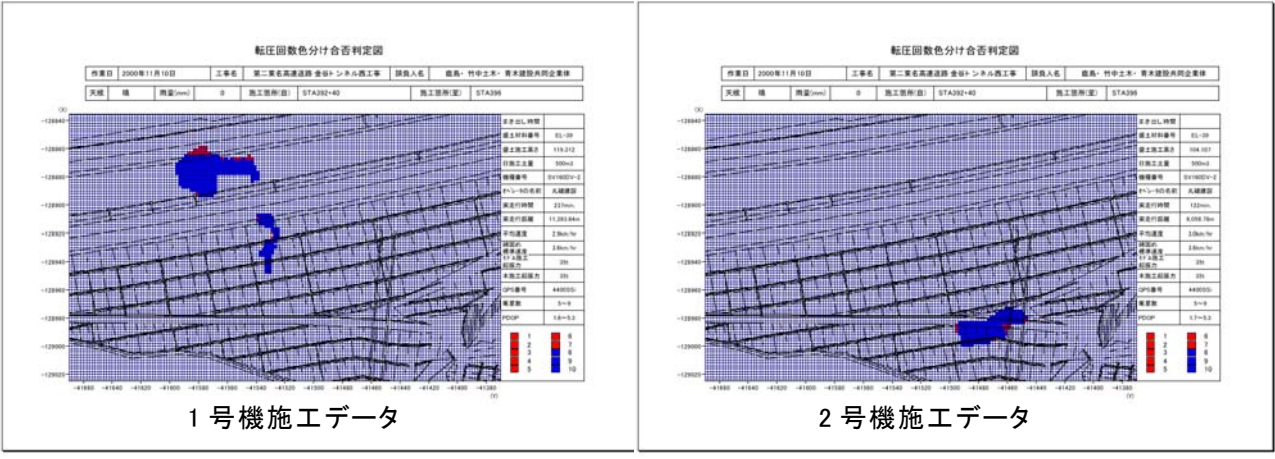


図 4.33 複数同時稼働時の処理

b. 適用例

図 4.34 に二台の締固め機械同時稼働時における転圧回数色分図の例として、1号機の施工データ、2号機施工データ、及び2台の合成した施工データを示す。



合成施工データ(日報)

図 4.34 複数同時稼働時におけるデータ処理例

(3) 特殊なケースにおけるシステムの適用性確認結果－継ぎ目部の処理

a. 処理の概要

隣接する盛土施工高さがほぼ同一の走行軌跡データを抽出し、(2)に示したデータ処理を通じて、合成された転圧回数色分図および層厚分布図を作成することができるようにした。

同一な盛土施工高さの LOG ファイル(走行軌跡データ)から作成された複数の PRS ファイル(転圧回数データ)を用いて、同一の層として PRS ファイルを合成し、転圧回数色分図を出力する。合成する際には、継ぎ目部分のブロックについては各 PRS ファイルの転圧回数の和を採用することとした。

LEV ファイル(標高データ)については、継ぎ目部分のブロックは標高の高い方を採用する。つまり図 4.35 の例では、継ぎ目部分の高さは白色の時点ではその時の高さデータ(○)となるが、新たに継ぎ目部分を転圧すると同時に高さデータも更新される(●)。層厚分布図については各 LEV ファイルのうちの高い方を用いて出力することができるようにした。

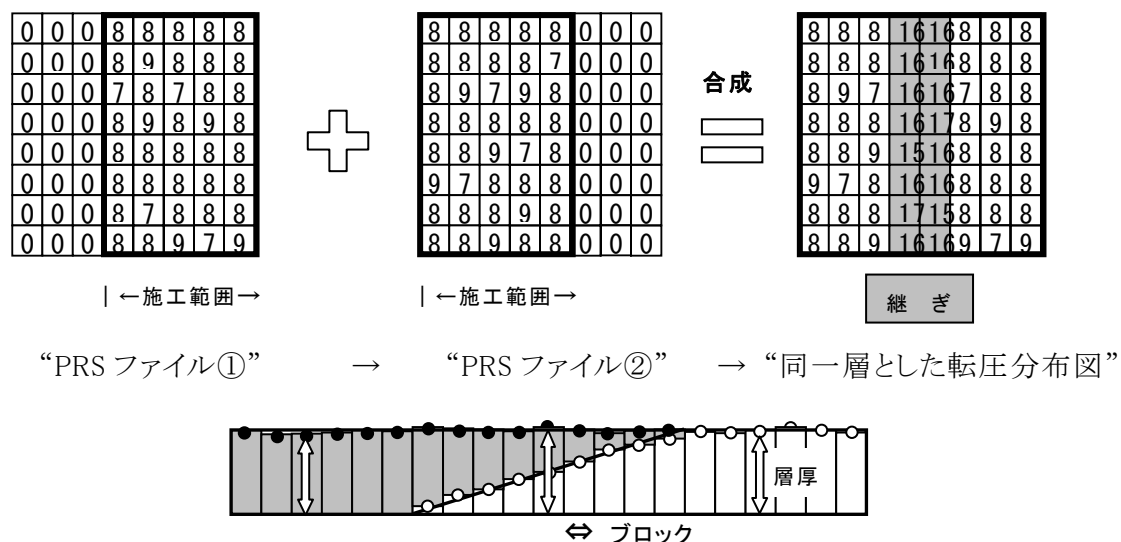


図 4.35 継ぎ目部の処理方法説明図

b. 適用例

継ぎ目部処理を行った走行軌跡図および転圧回数色分図の例として、二日間にわたり転圧した同一盛立て層について図 4.36 に示す。隣接する同一盛立て層の LOG ファイル(走行軌跡データ)が抽出できれば、合成した施工データを基に、図 4.35 の処理方法によって施工管理帳票の作成が可能であることが分かった。

<適用上の留意点・問題点および対応策>

同一盛立て層を抽出する際には、作業日報あるいは LOG ファイル(走行軌跡データ)全体の標高の平均値を指標にしている。本システムだけでデータを処理することを考えれば、LOG ファイルだけから何層目にあたるかを確認できることが必要である。しかし、一日の作業では標高の異なる離れた区域での施工もあり、さらに施工中の盛土地盤は平坦ではなく、排水勾配が施されることを考えると、現状の方法では効率よく処理することは非常に難しい。

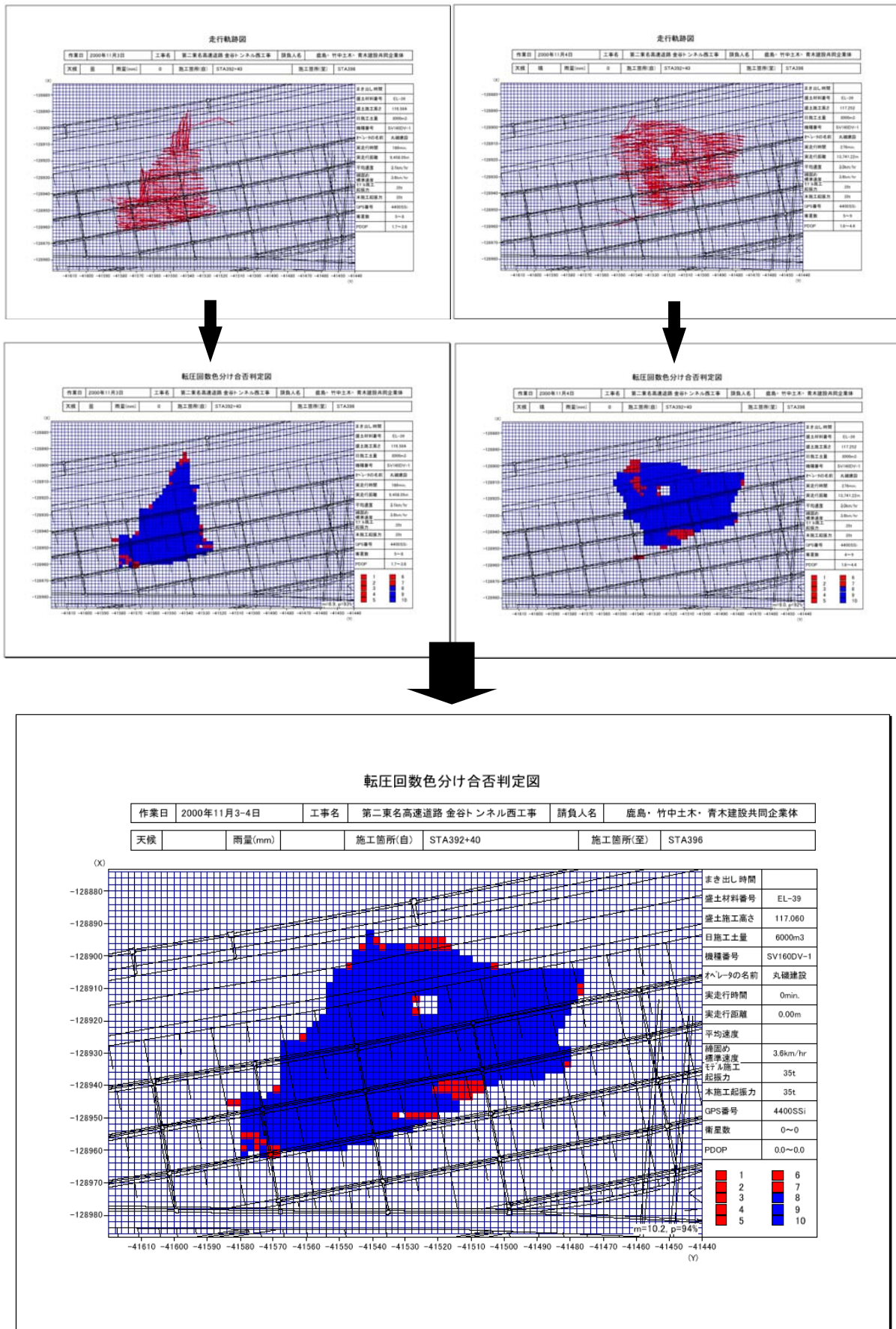


図 4.36 継ぎ目部のデータ処理例

4.4 無人化施工システムの開発

これまで報告した情報化施工システムの主要技術には、前節冒頭で述べたように、雲仙普賢岳復興工事における無人化施工システムと共通するものが多い。RTK-GPS を建設分野で本格的に利用したのも、この無人化施工システムが最初である。本節ではわが国の現在の情報化施工の原型となった無人化施工技術に関して記述する。

無人化施工技術は、人間が立ち入れない危険な作業現場で遠隔操作による建設機械で作業を行うもので、1994 年から雲仙・普賢岳の砂防事業において、旧建設省の「試験フィールド制度」を活用して、実施した。

この事業以降、雲仙・普賢岳の砂防事業として遊砂地内の緊急除石工事や水無川 1 号砂防堰堤の基礎掘削、堤体打設にも適用し、実用化するに至った。図 4.37 に無人化施工による除石作業のイメージを示す。図 4.38 に実際の無人化施工現場を示す。

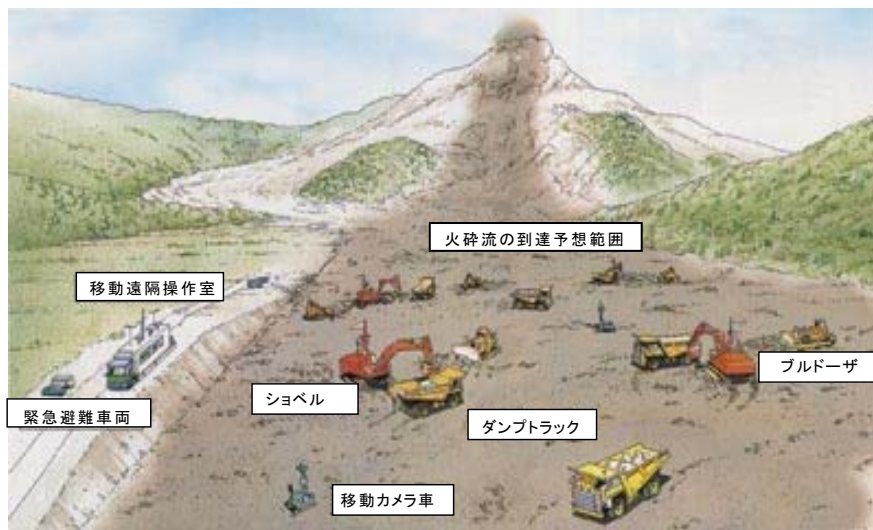


図 4.37 無人化施工システムイメージ⁶⁾



図 4.38 無人化施工現場

無人化施工における重機の遠隔操作システムでは、オペレータは、作業状況を確認するためにダンプトラック、油圧ショベル、ブルドーザ等の各々の建設機械に搭載したカメラや、図 4.39 に示すような、複数の建設機械相互の位置関係を把握するために施工エリア撮影用として配置した移動カメラの画像情報を頼りに、安全な場所に設置した遠隔機械操作室から建設機械を操作する。図 4.40 に遠隔機械操作室を示す。建設機械には、カメラの他に GPS を搭載して、機械の位置決めや他の建設機械との位置関係の掌握に利用している。その他、GPS 搭載車両を施工範囲内で走行させ、走行中の3次元位置データをもとに、施工範囲内の地形測量、出来形測量も実施した。また、図 4.41 に示す GPS 搭載のラジコンヘリコプターが開発され、所望の位置(X, Y, H)から自動で現場の撮影を行うことが可能となっており、危険地帯の状況把握に有効な手段になりつつある。なお、これらの GPS は情報化施工システムと同様に、ほとんどの場合 RTK-GPS 方式が採用されている。



図4.39 遠隔運転中の建設機械



図 4.40 遠隔機械操作室



図 4.41 自律型ラジコンヘリコプター

参 考 文 献

- 1) 「情報化施工のビジョンー21 世紀の建設現場を支える情報化施工ーについて」国土交通省・情報化施工促進検討委員会, pp.1-1～1-2, 2001.
- 2) 三浦 悟:IT で築く次世代施工技術:GPS フロンティア, 日本測量協会, pp.116～123, 2004.
- 3) 先村, ほか:油圧ショベル掘削指示システムの開発, 土木学会年講, 第6部, Vol.57, pp.921～922, 2002.
- 4) 例えば, 「情報化施工に向けた建設機械情報の標準化検討業務報告書」社団法人日本建設機械化協会施工技術総合研究所, 2003.
- 5) 三嶋, ほか:GPS を利用した土の締固め自動管理手法の導入, 土と基礎, Vol.48, No.4, pp.9～12, 2000.
- 6) 情報化施工と GPS, 地盤工学会誌 「土と基礎」, Vol53, No.12, pp.115～124, 2005.

5.情報化施工における管理システムの高度化

5.1 はじめに

GPSは誰でも簡単に地球上の3次元位置データを取得できるという理由で、土木分野の多くの場面で使用されてきた。一方で、計測技術的には既に欧米によって完成されたシステムであったため、性能向上に関する検討にはほとんど手をつけることができず、いわばカタログ上の性能の範囲で使用される状況にあった。しかし、GPSの精度を若干でも向上させることによって、適用範囲が飛躍的に広がる分野も多く、このため筆者は、使用者側の工夫によってGPSの精度向上が図れるのではないかと考え、性能向上にかかわる検討を行ってきた。

性能向上に関わる努力の結果実現した技術が、前章で示した情報化施工現場における盛土締固め管理システムである。このシステムは、GPSからの3次元位置計測データをそのまま用いて現場測量や建設機械位置誘導を行う技術と異なり、土工事における施工品質の評価法としての活用に注目した画期的な開発であるといえる。第4章では、基本的なシステムに関して述べたが、その実用化までには、多くの研究課題があった。

本章では、まず盛土締固め管理システムの実用化や適用範囲の拡大に際して解決が求められた課題を挙げ、それぞれについて検討してきた内容について記述する。また、さらに高い計測精度が求められる対象にも適用を広げるためのGPSの性能向上や、基準点等の測量インフラが整っていない海外においても当技術を適用することを目的として検討した内容について述べる。

盛土締固め管理システム等、土工事現場への導入を進めるにあたっては、実用検討に際して浮かび上がった課題を解決するために、以下の(1)から(5)の開発を行ってきた。

さらに、システムの適用範囲をより高精度の測量が要求される工事にまで拡大するため、あるいは海外工事にまで広げることを目的として、(6)及び(7)について検討を進めてきた。

(1) 施工規定方式における品質管理基準値の明確化

盛土締固め管理システムを用いた施工管理法である施工規定方式では、締固め機械の走行軌跡から施工エリア内に設定したブロック毎の締固め回数をカウントして、所定の回数に達していることで施工品質を管理する。このため、基本的には施工エリア内の全ブロックが所定回数に達するまで締固め作業を実施することになるが、実際の現場では地形の凹凸等による走行時の微小な蛇行(10cm程度)が締固め回数のばらつきとしてカウントされてしまう現象が発生した。このような走行軌跡のずれを全く許容しないと、必要以上に施工時間が掛かり、生産性が向上しないため、施工規定方式による施工エリアと従来の品質規定方式(RI計器による土の密度・含水量測定)による施工エリアに分け、各エリアの施工品質を比較し、施工管理基準値を決定する方法を提示した。

(2) 盛土層厚管理のためのデータ処理法の提案

締固め管理システムでは、締固め回数の管理とともに、締固め作業の対象である盛土の層

厚管理が重要であった。しかし、当初の施工要領で示されていた施工エリア全域での全管理メッシュにおける最大層厚を基準値とする管理方法は、理想形ではあるものの、GPSの測定データのバラツキや盛土材料の特性(局所的な凹凸等)によって基準値を満足できない場合が頻出するなど、非常に問題があった。このため、実用性が高いと考えられる定点での層厚管理方法及びデータの処理法に関して、現場実験を実施するとともに実工事でその有効性を確認した。

(3) 締固め管理システムを利用した沈下計測による盛土品質評価法の提案

従来から密度、含水比測定に代わる品質管理法として、締固め作業によって生ずる地表面の沈下量を測定する方法が論じられた。しかし、沈下量の計測は、光学式レベル計などを用いて計測する必要があったため、品質規定方式と同様にサンプリング測定に留まる他、省力化と迅速性の面でも課題が残っていた。そこで、施工規定方式で採用しているGPSによる締固め機械の走行データを利用し、締固め機械運転中の鉛直方向の変化を連続的に計測し沈下量を算出することで、盛土全面にわたり迅速かつ容易に「施工品質」と「盛土品質」を同時に把握する、より高度な管理手法の実現可能性に関して実験により確認した。

(4) 規定転圧回数の合理的な更新方法の提案

盛土締固め管理システム(施工規定方式)では、事前に締固めに関するモデル施工(転圧試験)を行って、遵守すべき施工方法(敷均し機種、敷均し厚、転圧機種、転圧回数など)を決定するとともに、施工中には所定頻度で盛土材の材料試験を行い、盛土材が以前と異なると判断した場合(性状が変化したと判断した場合)には、モデル施工を実施し直して、転圧回数などの施工方法を見直すことが前提である。しかしながら、モデル施工には、多大な費用や時間を要するため、施工規定方式の導入時障害の一つとなっている。このため、モデル施工を簡便な室内試験によって再現し、室内試験をモデル施工の代用として用いる方法を提案した。

(5) 締固め管理システムの山間部における適用性向上に関する提案

締固め管理システムの適用に際しては、リアルタイムGPSの原理から同時に5基以上のGPS衛星の観測が行なえ、現場基準点から途切れることのないデータ伝送が実現できることが基本条件である。しかし、実際の工事現場で常時盛土ヤードの全域にわたって良好な条件を備えた場所は多いとは言えない。このため、計測データの欠落が生じることがあり、RI等の従来管理方法の一時的使用が対応策として提案されているが、費用の増加、データ整理の煩雑化等が問題となっていた。そこで、測定に必要なGPS衛星基数が少なくても済み、基準点からのデータ伝送の必要がない単独測位法を利用する方法について、現場適用性実験を行い有効性を検証した。

(6) リアルタイムGPS測位の新たな精度向上策に関する提案

土木施工分野においてGPS測量、特にリアルタイムで数cmの精度で3次元位置が計測できるRTK-GPS測量は、情報化施工に不可欠な移動体計測には必須の技術となっている。し

かし、より精密な測量・計測が必要な場合にはまだ光学測量が使用されていた。この場合、光学測量機器は計測範囲がGPSに比べて著しく狭くなり、操作性も悪くなる。また、作業によって使用する計測機器を代えることは、非効率であり、経済性も低下する。このため、リアルタイムGPSの長距離での高精度化の可能性を実験的に検証した。その結果、FKP方式ネットワーク型リアルタイムGPSにおける計測範囲限定の基準点網再構築、及び複数の固定局の同時利用のRTK-GPS方式(Multi Baseline RTK-GPS)により性能が向上することを確認した。

(7) 海外工事におけるGPSの活用方法の提案

海外に進出する機会が急速に増大しつつある我が国の建設業界であるが、我が国の建設技術を我が国と同じ水準で情報化施工技術が適用できる環境が整っているとは限らない。GPSの適用にしても同様であり、国内で標準として適用されるRTK-GPSの使用するための必須インフラとなる公的基準点が整っていないことも多い。一方で、海外工事では施工範囲が広い大規模な土工事を伴うことが多いため、施工管理にGPSの活用が強く望まれる傾向にある。したがって、本研究では、このギャップを埋める具体的方策を提案した。

5.2 施工規定方式における品質管理基準値の設定とその評価¹⁾

5.2.1 締固め管理システムの特徴

施工規定方式における品質管理基準値を設定するに際し、まず現場転圧試験、試験施工を通してGPS締固め管理システムによる転圧回数分布の特性を把握した。

締固め範囲の考え方は、GPSによって計測される締固め機械中心の走行軌跡データに対し、締固め機械(振動ローラ)の振動輪幅2.15mを考慮した締固め範囲(締固め不足の危険性を考え、走行路に対して幅2.0m)を設定した。なお、管理ブロック(施工ヤードを細分化した正方形のブロック)の寸法が小さすぎると、モニタ上での視認性が低下して管理そのものが困難になること、管理ブロック数が増大して転圧回数分布図表示のための演算処理時間が大きくなりリアルタイムでの管理が困難となることから、管理ブロック寸法は、締固め機械(振動ローラ)の振動輪の幅($B=2.15\text{m}$)にほぼ等しい $2\text{m}\times 2\text{m}$ とした。

(1) 現場転圧試験による特性の把握

振動輪のラップ幅が15cmとなるように、 $40\text{m}\times 20\text{m}$ の施工ヤードを12レーン設け、転圧回数 $N=16$ 回の転圧作業を行った。

施工ヤード内には、白線でレーン表示を行い、締固め機械がより正確に走行できるようにした。

$N=16$ 回の転圧作業終了時における締固め機械の走行軌跡および転圧回数分布を図5.1、図5.2に示す。図5.1の太線は試験時の施工ヤードの範囲を示す。

図5.1によると、締固め機械はほぼ同一直線上を走行しているが、前進一後進転換位置に若干のずれが見られる。そのため、図5.2のように、施工ヤード内では実際の転圧回数を確実に表示できているが、施工ヤード外では所定の転圧回数を下回る管理ブロックが出現している。

(2) 試験施工による特性の把握

次に、実施工を想定して、約 $40\text{m}\times 30\text{m}$ の試験施工ヤードを設け、転圧回数 $N=8$ 回の転圧作業を行った。なお、施工ヤード内には、締固め機械走行時の目安となるような白線によるレーン表示は行っていない。

転圧作業終了時における締固め機械の走行軌跡および転圧回数分布を図5.3、図5.4に示す。

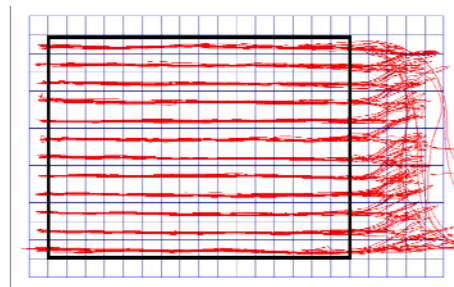


図 5.1 現場転圧試験時の走行軌跡図($N=16$ 回)

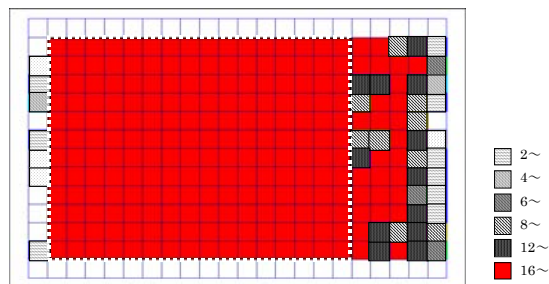


図 5.2 現場転圧試験時の転圧回数分布図($N=16$ 回)

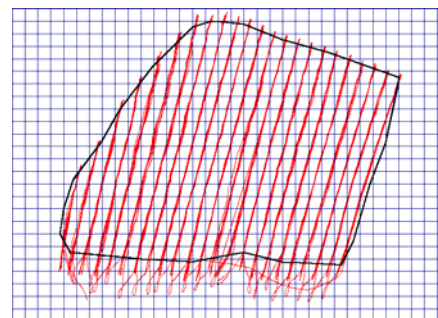


図 5.3 試験施工時の走行軌跡

図 5.3 の太線は試験施工時の施工ヤードの範囲を示す。また、締固め機械による転圧状況をより微視的に把握するため、管理ブロック寸法を 10 cm×10cm とした転圧回数分布を図 5.5 に示す。

図 5.3 では締固め機械の前進—後進位置のずれとともに最大 30cm 程度の横方向への走行軌跡のずれが見られ、それに伴って、振動輪ラップ幅のばらつきが生じている。

図 5.5 によれば、ラップ幅の最大値は 40cm 程度で、幅 10cm 程度のアンラップ部(規定転圧回数を 2 回程度下回る箇所)も生じている。このような走行軌跡のずれは施工誤差とみなすことができるが、図 5.4 に示す転圧回数分布図ではシステム解析上の誤差によって施工誤差が強調され、施工ヤード外周部では規定転圧回数を下回る管理ブロックが、施工ヤード内では規定転圧回数を上回る管理ブロックと下回る管理ブロックとが出現している。

なお、締固め機械走行時の目安となる白線によるレーン表示がない実施工時においては、走行軌跡のずれは重機オペレータの熟練度や路面不陸からも十分発生し得る。しかし、アンラップ部が生じたとしても、一度も締固められていない箇所はなく、規定回数より2回程度下回る箇所が極めて局所的に発生するだけであるため、盛土品質は確保されと考えられる。

5.2.2 品質管理基準値の設定

(1) 転圧回数分布図における外周部データ処理方法

図 5.2, 図 5.4 から明らかなように、転圧回数分布図の外周部には、規定転圧回数を下回る管理ブロックが多数出現している。これらの管理ブロックは実際の施工ヤード(盛土材料が撒き出された範囲)外に位置することから、規定転圧回数を満足する必要はないが、施工管理上、施工ヤードの範囲を明確にする必要がある。そこで、転圧回数分布図に表示される施工ヤード(転圧回数 $N \geq 1$ 回の管理ブロックの出現範囲)と実際の施工ヤードとが一致するように、外周部の管理ブロックを自動的に削除する処理手順を検討した。

具体的には、図 5.6 に示すように、転圧回数分布図における i 番目の管理ブロックの転圧回数が規定転圧回数を下回り、かつその周囲 8 個の管理ブロックのうち、3 個以上の管理ブロックで転圧回数が $N=0$ 回であれば、 i 番目の管理ブロックの転圧回数を $N=0$ 回とする。このような外周部データ処理方法の妥当性を検証するために、外周部データ処理後の施工ヤードと実際の施工ヤードとの比較を行った。

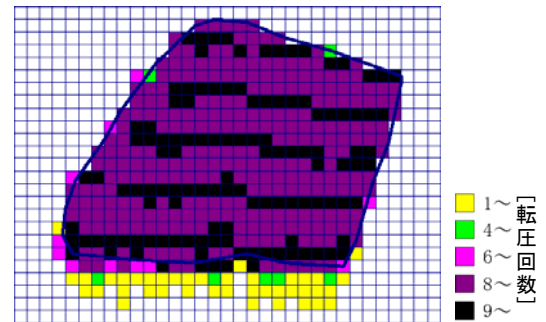


図 5.4 試験施工時の転圧回数分布
(管理ブロック:2m×2m)

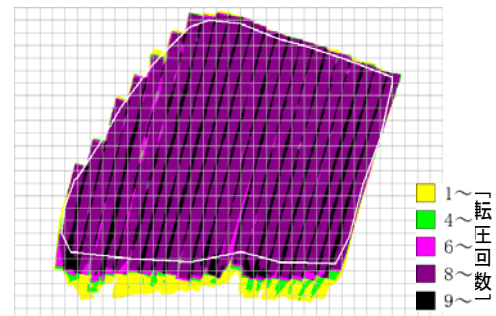


図 5.5 試験施工時の転圧回数分布
(管理ブロック:10 cm×10 cm)

その結果は図 5.7 に示すとおりであり、実際の施工ヤード外の管理ブロックをすべて削除することはできないが、品質管理の対象となる実際の施工ヤード内の管理ブロックが削除されることはなく、盛土の品質管理上は問題ないことが確認された。

(2) 施工ヤード内の補正処理方法

振動ローラ振動輪のラップ幅のばらつきの影響が強調されること(システム解析上の誤差)によって生じる施工ヤード内の転圧不足箇所を削除するために、施工ヤード内の補正処理を行うこととした。

補正処理方法は、図 5.8 に示すように、転圧回数色分図におけるi番目の管理ブロック周囲の8個の管理ブロックのうち、7個以上の管理ブロックで転圧回数が規定転圧回数以上であれば、i番目の管理ブロックの転圧回数が規定転圧回数未満であっても規定転圧回数とする。以上のような、外周部の補正処理、施工ヤード内の補正処理は、リアルタイムで行われるため、振動ローラに搭載されたパソコンに表示される転圧回数色分図は補正処理後のものとなり、所定以上の過度の転圧作業、それに伴う施工効率の低下が生じることはない。

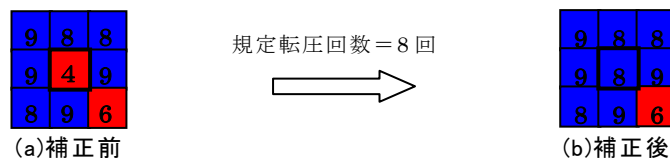


図 5.8 施工ヤード内の補正処理方法

5.2.3 品質管理基準値の妥当性の検討

(1) 品質管理基準値設定のための基本方針

図 5.6 や図 5.8(b)から明らかなように、外周部データ処理や施工ヤード内の補正処理を行っても、施工ヤード内には規定転圧回数を下回る管理ブロックが存在している。施工ヤード外については、前述のとおり、規定転圧回数を満足する必要はない。施工ヤード内の規定転圧回数を下回る管理ブロックについても、振動輪ラップ幅のばらつきやシステムの誤差によって生じたものであれば、盛土の品質上、特に問題はない。したがって、すべての管理ブロックを規定転圧回数以上とするような再転圧作業は、作業効率の低下を招くのみで、必ずしも盛土の高品質化につながるものではないと考えられる。そこで、施工ヤード内における所定の締固め密度は確保するが、規定転圧回数を下回る管理ブロックの出現はある程度許容することを基本方針として、品質管理基準値を設定することにした。

(2) 品質管理指標

施工されたヤード全体にわたる管理という観点から、全管理ブロックの平均転圧回数(Nave.)を採り上げ、また、規定転圧回数(Nreq.)を下回る管理ブロックの出現はある程度許容するという観点から、規定転圧回数以上の管理ブロック数(N_s)が全管理ブロック数(ΣN)に占める割合($N_s/\Sigma N$)を採り上げ、品質管理指標とした。

(3) 品質管理基準値の設定

第二東名・金谷トンネル西工事の盛土部での品質規定方式適用区域(図 5.9)において、約1ヶ月間、GPS 締固め管理システムを併用し、締固め密度測定データ、転圧回数分布データの収集を行った。また、施工規定方式適用区域内における盛土の長期的な挙動把握を目的として、動態観測を行うこととした。測定項目は、盛土の圧縮沈下量とし、図 5.10 の●に示す位置でクロスアーム式沈下計(地盤工学会規格 JGS1718)により測定した。

これらのデータをもとに、事前に定められた所定の締固め密度を満足するときの Nave.および $N_s/\Sigma N$ を求めると、それぞれ $Nave. \geq Nreq.$ 、 $N_s/\Sigma N = 89.9 \sim 99.0\%$ なる値が得られた。そこで、施工規定方式における品質管理基準値を $Nave. \geq Nreq.$ 、かつ $N_s/\Sigma N \geq 90\%$ と設定した。

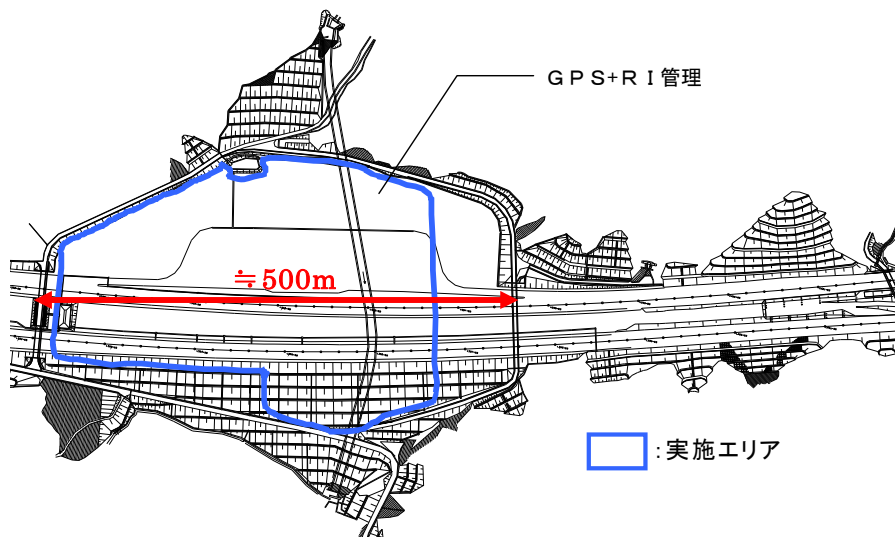


図 5.9 施工規定方式適用区域

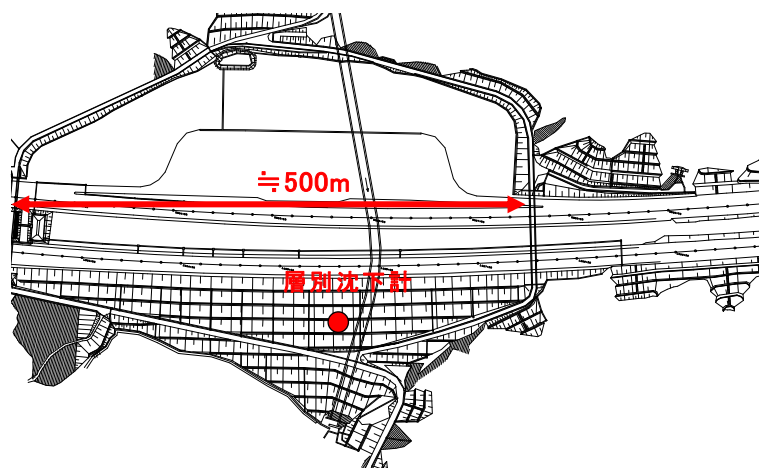


図 5.10 クロスアーム式層別沈下計設置位置図(平面図)

5.2.4 品質管理実績

以上のようにして設定した品質管理基準値に従って、第二東名・金谷トンネル西工事の盛土部で施工規定方式による管理を実施した。

施工規定方式による管理実績として Nave. 及び $Ns/\Sigma N$ の測定結果を図 5.11 に示す。

なお、図 5.11 中には、RI 計器によって計測された締固め密度測定結果から求めた特別規定値 D_s (盛土の乾燥密度/最大乾燥密度)も併せて示した。これによると、施工規定方式の適用期間中は、すべての施工箇所では品質管理基準値を満足しており、盛土の高品質化が図れたことがわかる。しかし、その一方で平均転圧回数(Nave.)が規定転圧回数(Nreq.)を2~4回以上も上回る、過度の締固め作業が行われた箇所も存在する。これは、実際の施工ヤード外に規定転圧回数を下回る管理ブロックが多数出現し、また、図 5.6 で示した外周部データ処理方法では削除仕切れなかった状況となり、品質管理基準値を満足できなかったために、再転圧作業が行われたことによる。また、品質規定方式、施工規定方式それぞれの適用区域に設置された層別沈下計(図 5.10)による盛土の挙動測定結果をもとに整理した、上載荷重(σ_v)と盛土厚 $\Delta H=5m$ 間で発生した圧縮ひずみ(ε)の関係を図 5.12 に示す。これ

によると、品質管理手法の違いによる盛土挙動の差異はほとんど見られず、上載荷重 $\sigma_v=130 \sim 140kN/m^2$ (盛土高さ $H \approx 6.5 \sim 7.0m$) のときの圧縮ひずみは、いずれも $\varepsilon=0.5\%$ 程度(盛土厚 $\Delta H=5m$ 間での圧縮沈下量 $\Delta S=2.5cm$ 程度)となっている。

したがって、新たな盛土品質管理手法である施工規定方式を適用しても、現行の品質規定方式(RI 計器による土の密度・含水量測定)を適用した場合と同等の品質を有する盛土を構築できたことが分かる。

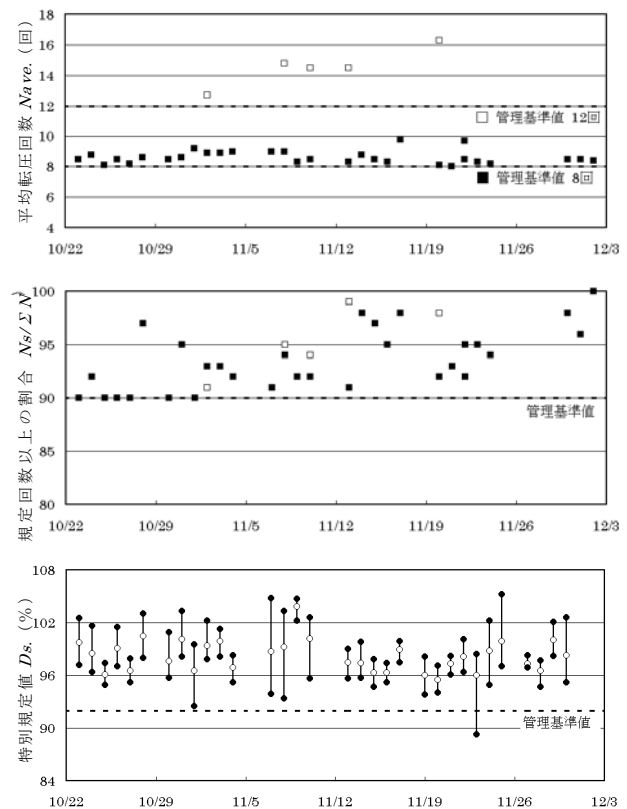


図 5.11 施工規定方式による管理実績

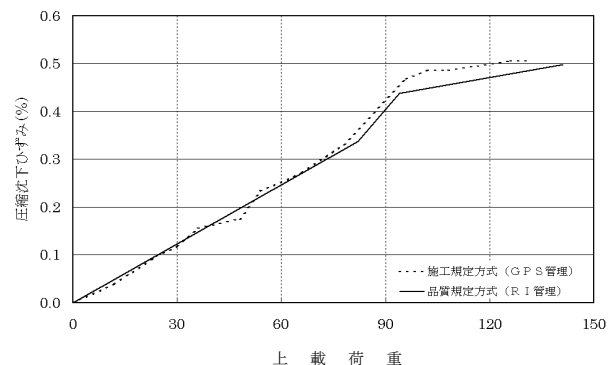


図 5.12 品質規定、施工規定方式適用区域での盛土の挙動測定結果

5.3 盛土層厚管理のためのデータ処理法

施工規定方式による施工管理では、決められた締固め機械により施工ヤード内のすべてのメッシュが規定の回数締固められ、すべてのメッシュが規定の締固め層厚であれば、モデル施工により決定した施工が履行されていると言える。すなわち、前節の「締固め回数の管理基準値」とともに、すべてのメッシュが規定の厚さで施工され、それがデータ化されていることが必要となる。

しかし、GPS による鉛直方向のデータには 3～5 cm のバラツキがあり、すべてのメッシュを規定厚さに締固めることは困難であった。このため、それらの状況を考慮した現実的な管理基準や管理方法が必要となっていた。

5.3.1 最大層厚管理

システム導入期には、下記理由により、『施工ヤード内の最大層厚』を管理基準値として企業者から提示されていた。すなわち、切盛境界部等では一般部に比べて締固め層厚が薄くなるため、平均層厚を管理基準とした場合には、層厚が大きい部位が検出できなくなるなど、品質管理上危険側の設定となりかねない。そこで、最大層厚 (h_{max}) が所定の厚さ以下で、かつ盛立て層数 (i) が所定の層数 (i_p) 以上となるように施工管理基準値が設定された。

最大層厚の算出に関しては、基本的には施工エリアに設定されたメッシュ(当初は $2m \times 2m$)毎に事前の標高データとの差を層厚としていた。しかし、メッシュの大きさと締固め機械の走行速度($4km/時間 \div 1.1m/秒$ 程度)を考えると、同一メッシュに入るのは 1～2 データとなり、それでメッシュの標高が決定されてしまうことになるため、計測データのバラツキがそのまま反映してしまい、物理的には考えられないような不連続な地形データとなってしまう恐れがあった。このような状況を避けるため、図 5.13 のような平滑処理を施した後のデータを用いることにした。

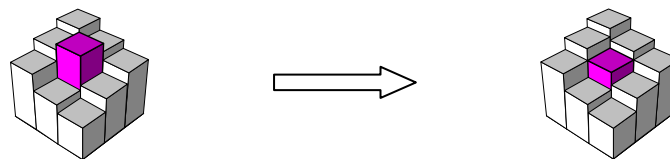


図 5.13 平滑処理の概要

【平滑化処理】あるメッシュの標高を決定する際、当該メッシュと周囲の 8 つのメッシュを加えた 9 メッシュの標高データの平均値を当該メッシュの標高データとする処理

本処理により、局所的な凹凸に左右されにくい標高データを得ることができる。また、全体形状を的確に捉えられるため、本処理の目的である締固め層厚の算出の際にも実際に則した結果が期待できる。

また、最大層厚に関する施工管理基準値は、盛土材料撒出し時の施工誤差 ($\pm 5 \sim 10cm$) と GPS による鉛直方向の測定精度 ($\pm 5cm$) を考慮して次のように設定した。

①(実際の盛立て層数) $i \geq$ (計画盛立て層数) i_p

[$i_p = (\text{計画盛土高}) / (\text{一層の締固め層厚})$]

②(最大層厚) h_{\max}

層厚 30cm の場合 : $h_{\max} \leq 40\text{cm}$ (施工誤差 $(30\text{cm} \pm 5\text{cm}) + \text{GPS 精度} (\pm 5\text{cm})$)

層厚 60cm の場合 : $h_{\max} \leq 75\text{cm}$ (施工誤差 $(60\text{cm} \pm 10\text{cm}) + \text{GPS 精度} (\pm 5\text{cm})$)

図 5.14 に前項の締固め回数管理も含めた、システム導入期の品質管理フローを示す。

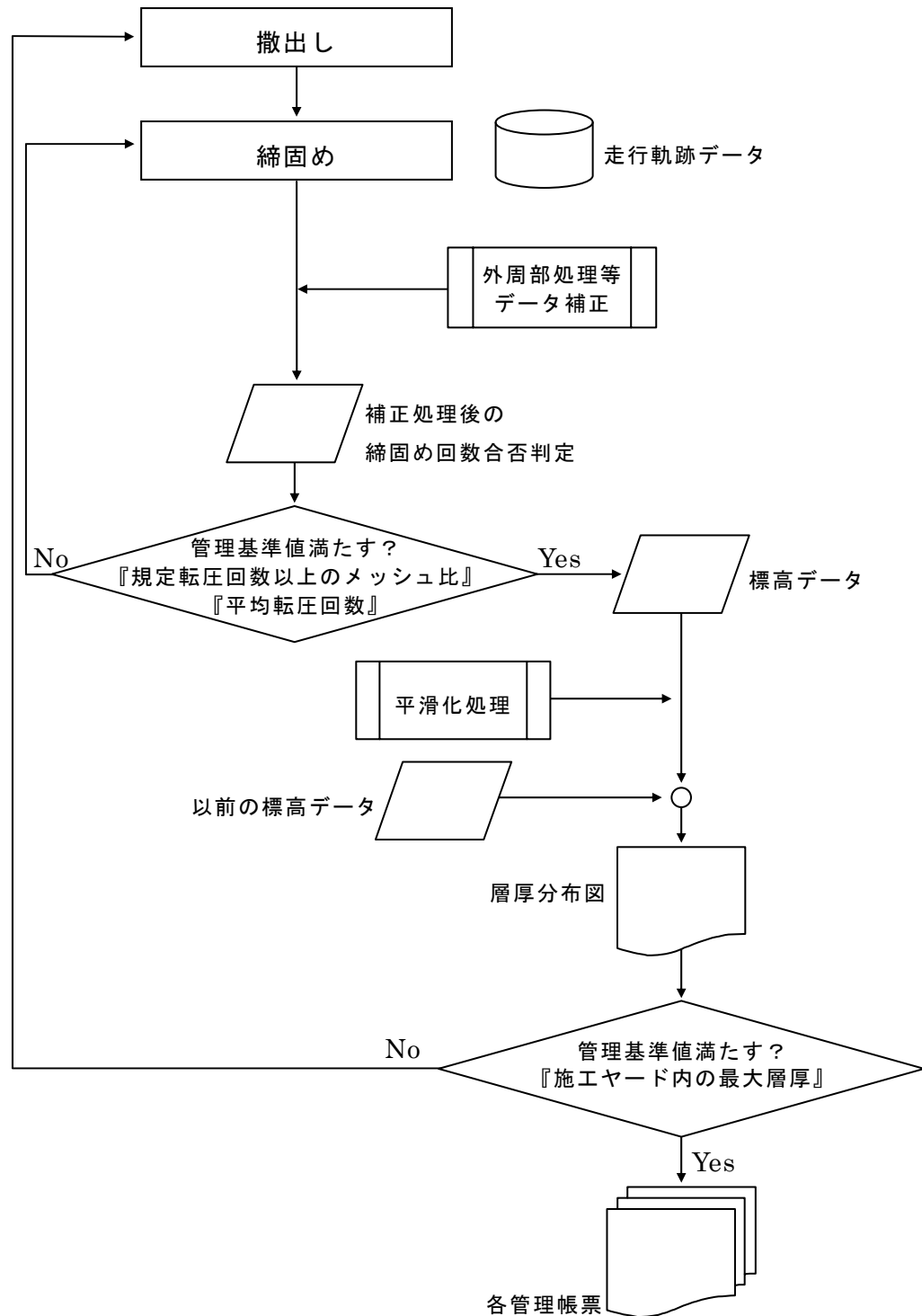


図 5.14 施工規定方式による管理フロー

管理基準値を満たさない場合、管理フローのとおり当該施工ヤードを掘り起こして再度撤出しを行い、転圧を繰り返すものとした。しかしながら、全メッシュを対象とし、全ての箇所で層厚基準値を満たすことは、現地形の凹凸、盛土材料の不均一性などにより、きわめて困難であり、施工効率の低下に繋がることが懸念された。

そこで、それまでの全てのメッシュ毎の高さ管理から、より現実的で実用性のある、定点での高さ管理方法を提案した。

5.3.2 定点層厚管理法

前項で述べたように、施工エリア全域の全管理メッシュに対し最大層厚を基準値とした当初実施していた管理では、GPS の測定データのバラツキや盛土材料の特性(局所的な凹凸等)によって基準値を満足できない場合が頻出するなど、問題があった。このため、より実用性が高いと考えられる定点での高さ管理方法の導入に関して、現場実験を実施するとともに、実工事でその適用性を確認した。

(1) 現場実験概要

a. 実施目的

従来の層厚算出の問題点を整理して、盛土の管理における層厚管理方法として、事前に取り決めた定点での層厚を求める方法の適用性について検討した。図 5.15 は、道路土工を例に、定点の設定のやり方例を示す。この管理表の例では、道路中心の 10m 間隔に測線を設定して、その測線上で道路中心からの距離を基に測定点を設定している。このように設定された測定点毎に図 5.16 に示す「盛土管理表」を作成し、層数、施工日、盛土材料、転圧回数、標高値などを記入する管理方法を検討した。このために、軌跡データから「盛土管理表」作成に必要な指定位置(測点)の品質管理データ(具体的には標高データ)を抽出するアルゴリズムを構築することが必須となった。

b. 実施場所

第二東名金谷トンネル西工事(静岡県掛川市)

STA.395+60～STA.396+70

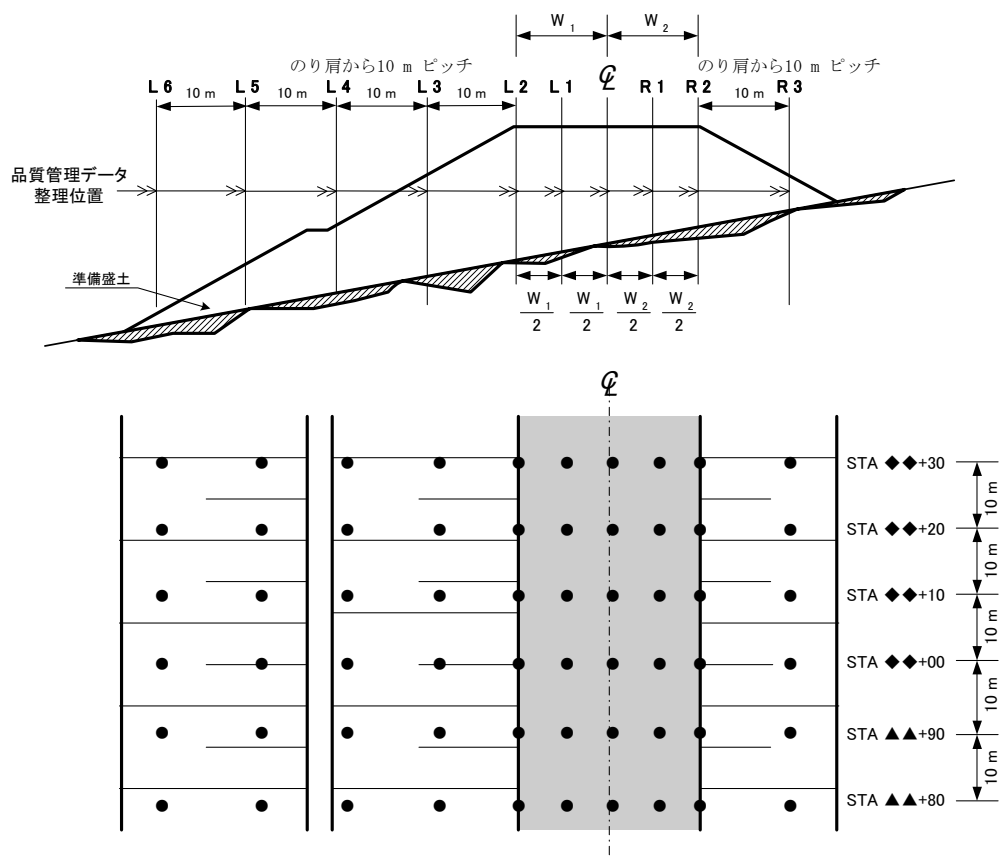


図 5.15 盛土管理表作成のための測線配置の例

STA 140+20

測定箇所:L 4 , センターからの距離: 30m											
層数	施工日	盛土材料区分	転圧指示回数	一層仕上り厚さ (cm)	計画高さ (m)	施工高さ (m)	施工厚さ (cm)	転圧実施回数 (回)	転圧実施回数と転圧指示回数の差 (回)	備考	
22	2001/11/15	EI3-2	6	60	150.25	150.23	58	8	2		
21	2001/11/15	EI3-2	6	60	149.65	149.65	57	5	-1		
20	2001/11/14	EI3-2	6	60	149.05	149.08	61	6	0		
19	2001/11/13	EI3-2	6	60	(転圧実施回数-転圧指示回数)で算出					0	
18	2001/11/9	EI3-2	6	60						0	
17	2001/11/7	EI3-2	6	60	147.25	147.25	58	6	0		
16	2001/11/5	EI3-2	6	60	146.65	146.67	62	6	0		
15	2001/11/4	EI3-2	6	60	146.05	146.05	61	6	0		
14	2001/11/2	EI3-2	6	60	145.45	145.44	60	7	1		
13	2001/11/1	EI3-2	(施工高さ-前層の施工高さ)で算出				60	10	4		
12	2001/10/28	EI3-2					57	6	0		
11	2001/10/24	EI2-1	8	60	143.65	143.67	63	10	2		
10	2001/10/23	EI2-1	8	60	143.05	143.04	57	10	2		
9	2001/10/20	EI2-1	8	60	142.45	142.47	64	7	1		
8	2001/10/18	EI2-1	8	60	141.85	141.83	58	8	0		
7	2001/10/17	EI2-1	8	60	141.25	141.25	58	8	0		
6	2001/10/16	層厚:0層は準備盛土仕上り面のこと				65.05	備考欄は、施工時に発生した障害などを記入する				
5	2001/10/15										
4	2001/10/11	EI2-1	8	60	139.45	139.46	62	10	2		
3	2001/10/9	EI2-1	8	60	138.85	138.84	60	6	-2		
2	2001/10/6	EI2-1	8	60	138.25	138.24	58	8	0		
1	2001/10/5	EI2-1	8	60	137.65	137.66	61	8	0		
0	2001/10/4	-	-	-	137.05	137.05	0	-	-		

材料試験番号を入力する

計画高さ及び施工高さは標高で記入する

図 5.16 盛土管理表の記入例

図 5.15 及び図 5.16 は、日本道路公団「施工規定方式(GPS 法)による盛土の品質管理方法(案)平成 13 年 7 月」より抜粋した

c. 実施内容

i) 試験エリアの設定

- ① GPS 衛星の捕捉環境が良好な区域として図 5.17 に示す位置を選択した。
- ② 道路とほぼ平行に図 5.18 に示す 150m×40m のエリアを設定した。
- ③ 上記エリアを試験エリアとし、四隅の座標値を決定した。
- ④ 試験エリア内をとる 10m 間隔の測線を 12 本決定した(図 5.18 参照)。

ii) 基盤の測量

- ① 決定した試験エリアの四隅および測線両端部に基準杭を設置した。
- ② 光波測量器により各測線上を 1.0m 間隔で測量した(約 400 点)。

iii) ブルドーザによる撒き出し

- ① 試験エリア全体に盛土を撒き出した。
- ② 転圧後の層厚が 30cm となるように、33cm 厚で敷き均しを行った。図 5.19 に敷き均し後の状況を示す。

iv) 出来形の測量

- ① 基準杭間にロープを張り、測線上を 5.0m 間隔に図 5.20 に示す RTK 測位を実施した。
- ② 1点あたり 10 秒程度静止して、その平均標高値を採用した。
- ③ 局所的な凹凸の影響を防ぐように GPS アンテナを保持した。
- ④ 基準杭上における測量を実施し、光波測量器との整合性を確認した。

v) 締固め機械(振動ローラ)による転圧

- ① GPS 搭載機械でエリア全体を 8 回転圧し、1 秒ごとに RTK 測位データを記録した(軌跡データ取得)。施工速度は通常時と同等(4km/h)とした。締固め状況を図 5.21 に示す。
- ② 図 5.22 に示すようにエリアを三分割し、それぞれ重機の走行方向を 1)道路と平行・2)道路と直角・3)管理ブロックと平行、と変化させた。

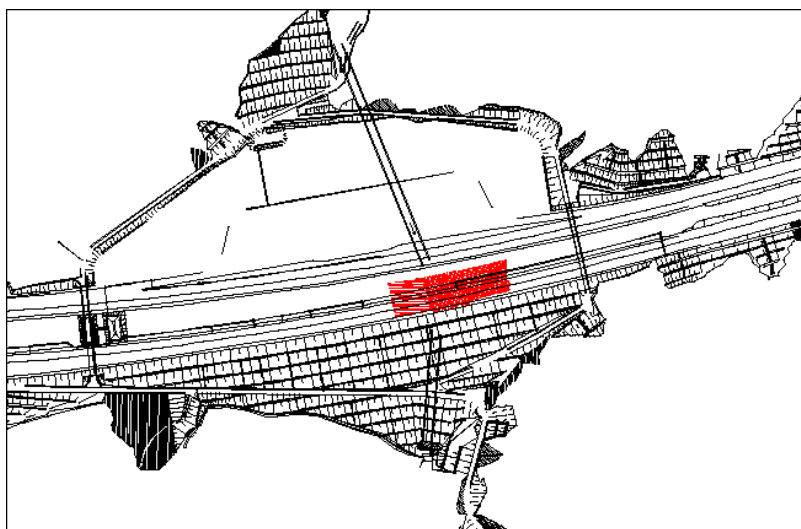


図 5.17 実施箇所

vi) 出来形の測量

- ①間隔を 2.0m に変更し測量する。測量方法はiv)に同じ(実測データ取得)。
- ②得られた標高データをもとに横断面図を作成した。

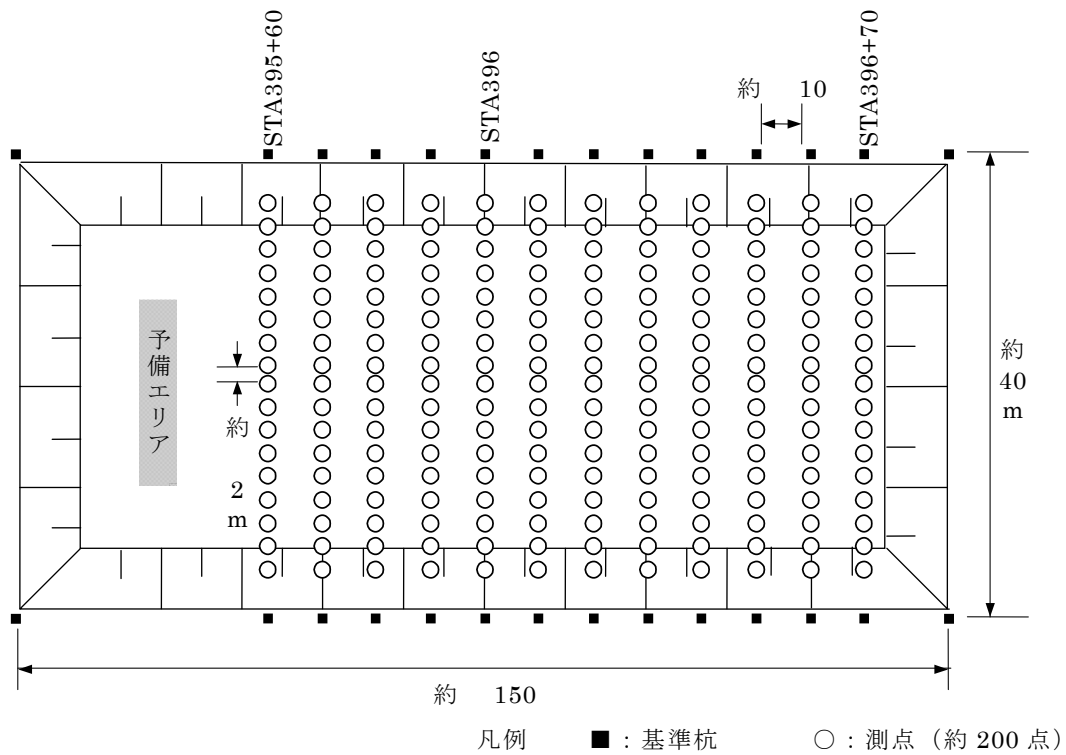


図 5.18 試験エリアの構成



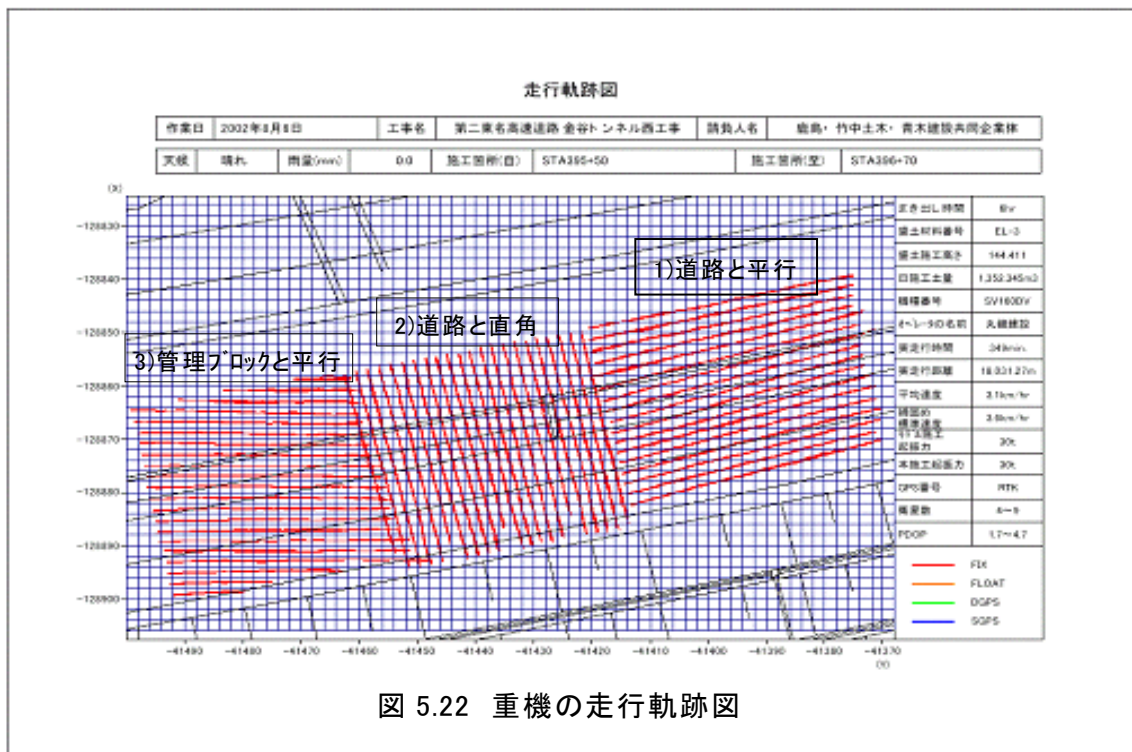
図 5.19 敷き均し終了



図 5.20 RTK 測量



図 5.21 締固め状況



(2) 管理方法の設定

a. 解析方法

解析は以下のように実施した。

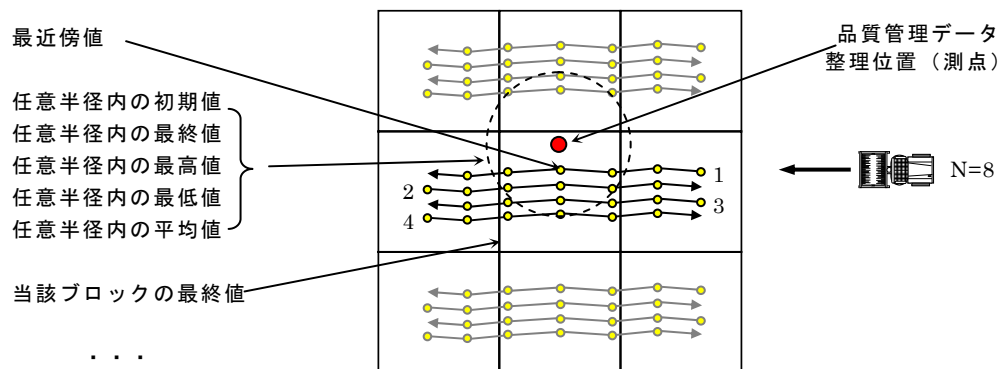
- 前項(1)c.v)の軌跡データを取得し、測位モードがフィックスであることを確認する。
- 下記に示す手法により、測点ごとに軌跡データから標高データを抽出した。測点の座標値は、前項(1)c.vi)で得られた2.0m 間隔の測量結果を採用する。図 5.23 に標高データの抽出法を図示し、解析に用いた実験時の軌跡データと測点位置関係を図 5.24 に示す。

①測点の最近傍値

②測点の任意半径内の初期値・最終値・最高値・最低値・平均値

③測点を含む管理ブロック内の最終値

- 前項(1)c.vi)で得られた横断面図と比較して、実情に則した最適なデータ抽出アルゴリズムを決定、あるいは構築する。



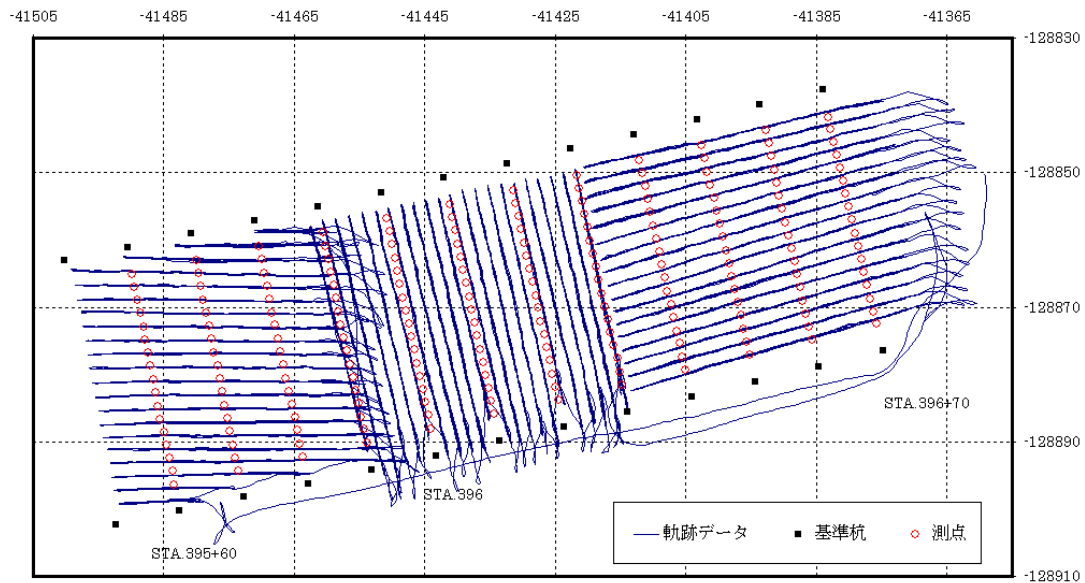


図 5.24 軌跡データと測点位置

①測点の最近傍値

軌跡データの中から、測点との水平距離が最も近いデータの標高データを採用する。

一点のみのデータであるため、そのばらつきに大きく依存することが懸念される。

②測点の任意半径内の初期値・最終値・最高値・最低値・平均値

測点を中心とした半径 $R(m)$ の水平面上の円を仮定し、その範囲内の軌跡データの中から以下の手法で採用する。

- a)初期値法 範囲内のデータのうち時間的に最初にあたる標高データ
- b)最終値法 範囲内のデータのうち時間的に最後にあたる標高データ
- c)最高値法 範囲内のデータのうち最高の標高データ
- d)最低値法 範囲内のデータのうち最低の標高データ
- e)平均値法 範囲内のデータを算術平均したデータ

ここでは、締固め機械の速度から想定される軌跡データの距離間隔や、締固め機械(振動ローラ)の振動輪幅を考慮して、半径を 0.25, 0.50, 1.00, 2.00m と変化させることとした。

③測点を含む管理ブロック内の最終値

測点を含む管理ブロック内の軌跡データの中から、締固め作業中の沈下を考慮して時間的に最後にあたるデータの標高データを採用する。現状システムで対応できる反面、管理ブロック(2×2m)以下の位置分解能は有さない。また一点のみのデータであるため、そのばらつきに大きく依存することが懸念される。

b. 解析結果

軌跡データの中から上記①～③に示す手法でデータを抽出し、前項(1)c.vi)に示した要領で実施した転圧後の出来形測量結果(実測データ)と比較する。図 5.25 に示すように測点は 1

測線あたり 17 点であり、試験エリア全体では 17 点×12 測線の 204 データが得られている。

表 5.1 に各手法での算出結果と出来形測量結果(実測データ)との比較を示す。なお、ここで手法②については e) 平均値法を代表して記載し、他手法に関しては半径 0.50m 以外については割愛した。

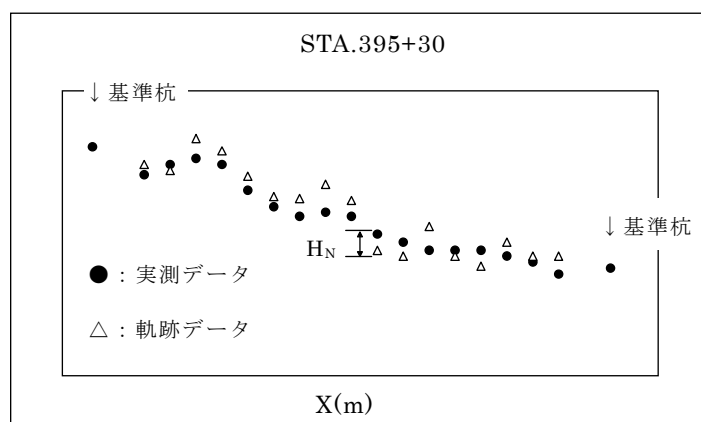


図 5.25 標高データの比較

表 5.1 各手法の実測データとの比較 単位 mm

手法		標準偏差 σ	平均 \bar{H}	最大 MaxH	最小 MinH
①最近傍値		26.1	0.3	108.9	-66.2
②半径 0.25m	e) 平均値法	22.9	-1.7	60.4	-64.0
②半径 0.50m	a) 初期値法	26.7	6.3	108.9	-74.0
	b) 最終値法	25.3	-3.9	108.9	-64.1
	c) 最高値法	24.9	11.0	108.9	-54.0
	d) 最低値法	25.0	-10.0	108.9	-74.1
	e) 平均値法	24.0	0.2	108.9	-64.0
②半径 1.00m	e) 平均値法	23.4	-2.5	92.2	-66.4
②半径 2.00m	e) 平均値法	22.3	-0.8	86.9	-54.6
③管理ブロック内最終値		36.0	0.7	136.0	-86.0

標準偏差はすべて RTK-GPS の標高精度 (20~30mm) を満たしているが、手法③は他手法に比べて 1.5 倍程度悪い結果であった。「盛土管理表」作成上、その差は有意であり、適した手法とは言えない。前述したように一点のデータのみに依存することの脆弱性があらわれたものと考えられる。その点を鑑みれば、今回は顕在化しなかったが手法①についても、同様の危険性をはらんでいることから最適とは言えない。

手法②については、②e) 平均値法が比較的標準偏差が小さく、平均が 0 に近い良好な結果が得られ、「盛土管理表」作成に足る精度を確保していると言える。また、②a) 初期値法では沈下が考慮されずに標高が高い傾向に、逆に②b) 最終値法ではローラ自重による一時的な沈下が影響しているのか低い傾向にある。平均値法以外の手法では一点のデータのみの採用であるため、当該データのばらつきに大きく依存してしまう結果、②c) 最高値法や②d) 最低値法の平均に偏りが生じていると考えられる。よって手法②の中では、平均値法が最も適当であると考

えられる。

平均値法を含め表 5.1 における最大～最小が 150mm 程度存在しているが、これは図 5.26 における $X=-128869$ の測点付近の岩材料によるものと思われる局所的な凹凸に追従しきれていないことによるもので、重機の構造上不可避であると考ええる。しかし、このことを除けば図 5.26 に示すように横断面図作成に対して、いずれの手法も適用性があることが分かる。

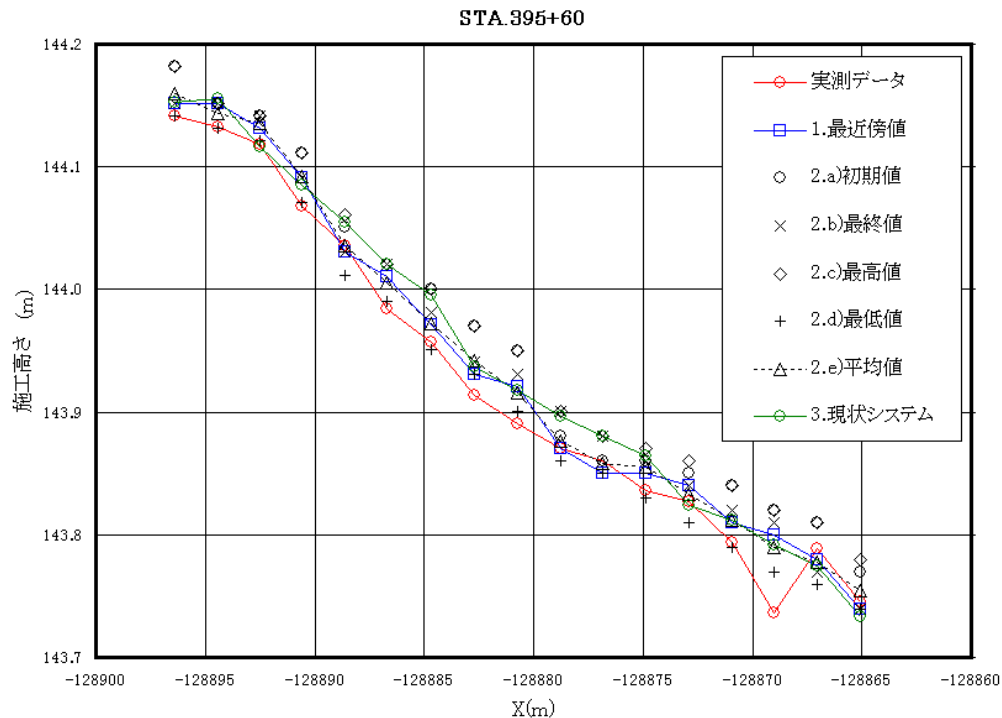


図 5.26 各手法の標高データの比較

c. 採用アルゴリズムの構築

手法②に示した円の仮定による採用データの範囲設定では、表 5.2 に示すように測点と走行軌跡の位置関係に由来する採用データ数の違いによる精度のばらつきや、範囲内に少数データしかない場合の影響が大きいこと、測点によっては該当データがない場合も見受けられるなど、各測点ごとにデータの質が異なることが懸念される。

表 5.2 手法②による1測点あたりの採用データ数

半径	平均データ数	最大データ数	最小データ数
0.25m	0.83	7	0
0.50m	3.33	49	0
1.00m	14.85	83	0
2.00m	60.91	424	10

一方で、平均値法をはじめとする時間および標高を考慮しない抽出方法では、表 5.1 のように実測値との差の平均が数 mm 程度となり、横断面図の作成に効果的であることも確認できた。

そこで、以下に示す新手法を提案する。

- 1) 測点と軌跡データの水平距離を算出
- 2) 水平距離が $R(m)$ 以下のもののうち、距離の短い N 番目までのデータを検索※
- 3) 2)に該当する N 個のデータの平均標高を採用

※測点との距離が $R(m)$ 以下の軌跡データが N 個未満の場合、該当標高なしとする。

表 5.3 に本手法により $N=1, 2, 4, 8, 16$ まで変化させた場合の比較を示す。

表 5.3 新手法の実測データとの比較 単位 mm

採用データ数 N	標準偏差 σH	平均 \bar{H}	最大 $\text{Max}H$	最小 $\text{Min}H$
1 データ (最近傍値)	26.1	0.7	108.9	-66.2
2 データ	25.4	0.7	108.9	-61.4
4 データ	25.1	0.1	93.9	-66.5
8 データ	24.9	0.1	96.4	-66.4
16 データ	24.0	-0.1	92.6	-59.7

理想的には平均が 0 であることを考えれば、表 5.3 から、4 データ以上の平均値を採用することが必要となると考えられる。一方、GPS データは 1 秒ごとに取得しており、重機速度が約 4km/h であるため、走行方向では約 1.1m 毎に 1 点の標高データが得られることになる。また、締固め機械(振動ローラ)の振動輪の幅を $L(m)$ とすると、締固め機械の走行路は、ほぼ $L/2(m)$ 毎に横方向に移動することになる。すなわち、走行路の直角方向には $L/2(m)$ 毎に 1 点の割合で標高データが得られることになる。以上の条件を考慮すると、測点からの半径(R) $L/2(m)$ 以内をデータの採取範囲とすることが妥当であると考えられる。

また、データの採取個数に関しては、4 個以上としたが、新手法によるデータ検索は位置的条件のみ依存するため、データ数が少ないと、初期転圧時に近いデータのみを偏って検索してしまい、転圧完了後に比べて高い標高データを採用してしまう可能性も回避できないという観点から、データ数を減らすことによるメリットは少ないと考えられる。また、規定転圧回数が 8 回であれば、8 回分のデータを平均することが平均高さとしては妥当である。そこで、基本的になデータ数としては、転圧回数を採用することにした。今回の実験では、 $N=8$ となる。

以上によって、時間的な影響のない抽出が実現でき、得られた標高データのばらつきは算術平均することにより影響を低減しつつ、横断面作成に必要な精度維持を意図するデータ処理法が構築できた。図 5.27 に新手法の実測データとの比較例を示す。

本手法によれば、以下のような利点がある。

- ・ データの抽出が比較的簡単
- ・ データのばらつきを低く抑えることができる(大誤差の回避)
- ・ 測点ごとのデータ品質がすべて同等
- ・ 重機の走行方向によらず有効
- ・ 規定転圧回数の変化に対し、抽出データ数を変更することで対応可能

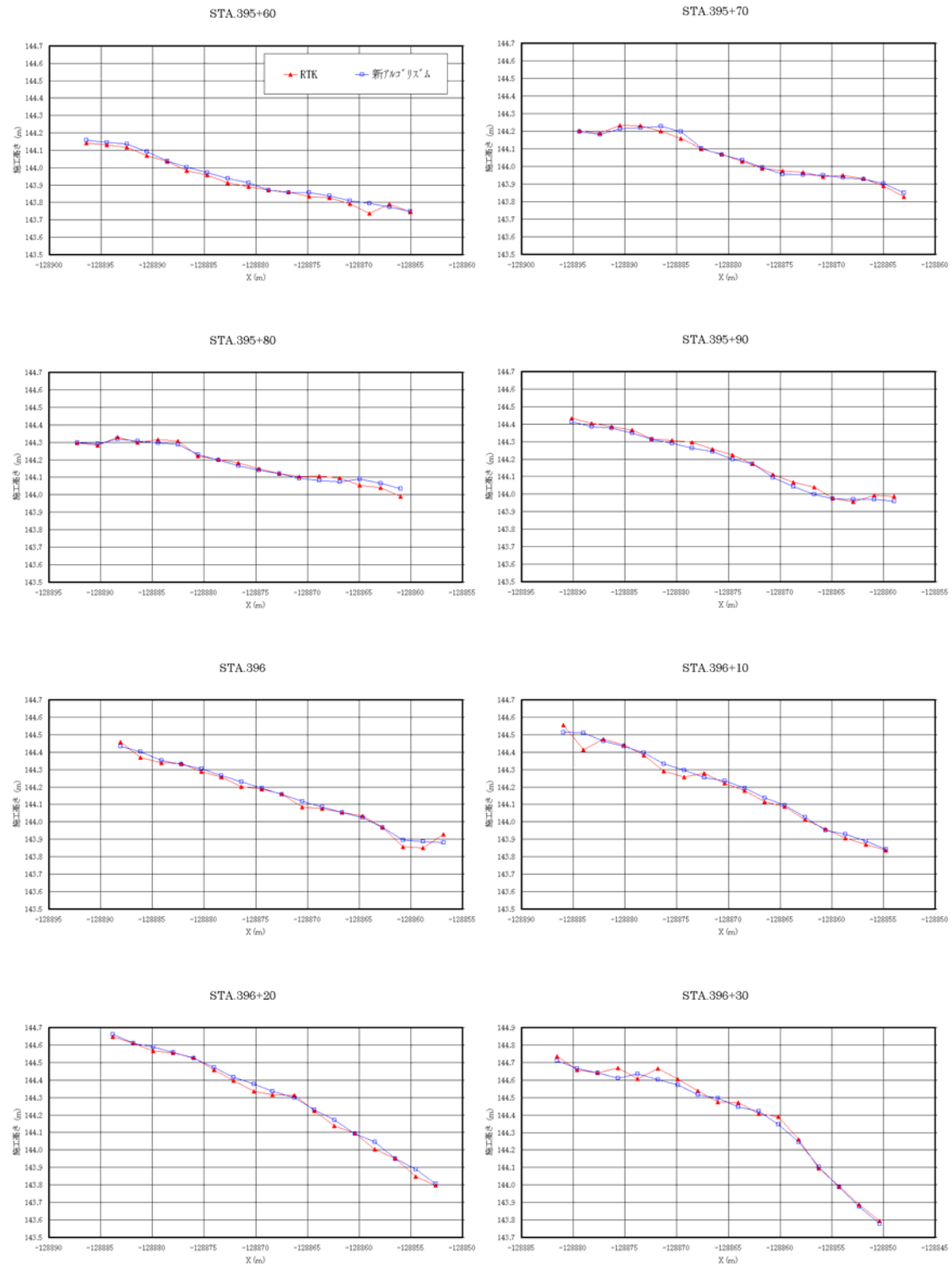


図 5.27 新手法の実測データとの比較例

d. まとめ

本手法を実工事で適用し、長期にわたるデータの蓄積の結果、盛土管理表作成のための標高データ抽出アルゴリズムの適合性を確認することができた。この結果、本システムにより転圧判定を行った殆どすべてのエリアにおいて、本件等の目的である、施工管理のための盛土管理表の作成が可能な環境を整えることができた。

実験後、第二東名金谷トンネル西工事での実運用によって実証した。工事において作成した盛土管理表の出力例を表 5.4 に示す。一層毎の層厚及び、複数層厚での施工厚さ(表 5.4 では 5 層)の設計値との比較が容易に行え、層厚管理法としての実用性が高いことが分かる。

なお、この表で設定されている層厚管理のための測定点は、実証のために別途設定したものであり、図 5.15 の一般道路土工の設定方法とは異なっていることを、補足しておく。

表 5.4 盛土管理表の例*

STA 396+60

No. 17 測定箇所: L19 センターからの距離: 19m										
層数	施工日	盛土材料区分	転圧指示回数	一層仕上り厚さ (cm)	計画高さ (m)	施工高さ (m)	施工厚さ (cm)	転圧実施回数 (回)	転圧実施回数と転圧指示回数の差 (回)	施工厚さ (実績-設計) (cm)
5	2002/11/1	EL-14	8	30	147.04	147.11	30	8	±0	±0
4	2002/10/29	EL-14	8	30	146.74	146.81	27	8	±0	-3
3	2002/10/24	EL-14	8	30	146.44	146.54	29	8	±0	-1
2	2002/10/21	EL-14	8	30	146.14	146.25	36	8	±0	+6
1	2002/10/14	EL-14	8	30	145.84	145.89	35	8	±0	+5
0	2002/10/8	EL-14	8	0	145.54	145.54	0	8	±0	±0
計				150			157			+7

STA 396+60

No. 18 測定箇所: L9 センターからの距離: 9m										
層数	施工日	盛土材料区分	転圧指示回数	一層仕上り厚さ (cm)	計画高さ (m)	施工高さ (m)	施工厚さ (cm)	転圧実施回数 (回)	転圧実施回数と転圧指示回数の差 (回)	施工厚さ (実績-設計) (cm)
5	2002/11/1	EL-14	8	30	147.20	147.19	29	8	±0	-1
4	2002/10/29	EL-14	8	30	146.90	146.90	28	8	±0	-2
3	2002/10/24	EL-14	8	30	146.60	146.62	31	8	±0	+1
2	2002/10/21	EL-14	8	30	146.30	146.31	29	8	±0	-1
1	2002/10/14	EL-14	8	30	146.00	146.02	32	8	±0	+2
0	2002/10/8	EL-14	8	0	145.70	145.70	0	8	±0	±0
計				150			149			-1

STA 396+60

No. 19 測定箇所: CL センターからの距離: 0m										
層数	施工日	盛土材料区分	転圧指示回数	一層仕上り厚さ (cm)	計画高さ (m)	施工高さ (m)	施工厚さ (cm)	転圧実施回数 (回)	転圧実施回数と転圧指示回数の差 (回)	施工厚さ (実績-設計) (cm)
5	2002/11/1	EL-14	8	30	147.34	147.19	32	8	±0	+2
4	2002/10/29	EL-14	8	30	147.04	146.87	25	8	±0	-5
3	2002/10/24	EL-14	8	30	146.74	146.62	22	8	±0	-8
2	2002/10/21	EL-14	8	30	146.44	146.40	29	8	±0	-1
1	2002/10/14	EL-14	8	30	146.14	146.11	27	8	±0	-3
0	2002/10/3	EL-14	8	0	145.84	145.84	0	8	±0	±0
計				150			135			-15

STA 396+60

No. 20 測定箇所: R9 センターからの距離: 9m										
層数	施工日	盛土材料区分	転圧指示回数	一層仕上り厚さ (cm)	計画高さ (m)	施工高さ (m)	施工厚さ (cm)	転圧実施回数 (回)	転圧実施回数と転圧指示回数の差 (回)	施工厚さ (実績-設計) (cm)
5	2002/11/1	EL-14	8	30	147.34	147.11	27	8	±0	-3
4	2002/10/29	EL-14	8	30	147.04	146.84	24	8	±0	-6
3	2002/10/24	EL-14	8	30	146.74	146.60	21	8	±0	-9
2	2002/10/21	EL-14	8	30	146.44	146.39	22	8	±0	-8
1	2002/10/14	EL-14	8	30	146.14	146.17	33	8	±0	+3
0	2002/10/3	EL-14	8	0	145.84	145.84	0	8	±0	±0
計				150			127			-23

* この表における測定箇所は第二東名金谷トンネル西工事で設定した測線、測点の試行結果であり、図 5.16 の例とは異なる。

5.4 締固め管理システムを利用した沈下計測による盛土品質評価法の検討²⁾

5.4.1 概要

従来から密度、含水比測定に代わる品質管理法として、締固め作業によって生ずる地表面の沈下量を測定する方法が論じられていた。しかし、沈下量の計測は、光学式レベル計などを用いて計測する必要があったため、従来の品質規定方式と同様、サンプリング測定に留まる他、省力化と迅速性の面でも課題が残っていた。そこで、施工規定方式で採用している方法を利用し、締固め機械運転中の鉛直方向の変化量を連続的に計測できる可能性に注目し、これを利用して沈下量を算出することで、盛土全面にわたり迅速かつ容易に、締固め回数の自動測定による「施工品質」と「盛土品質」を同時に把握することができる、より高度な管理手法の実現可能性について現場での実験により検討した。

5.4.2 実験方法

実験の目的は、締固め作業時に生じる地表面の沈下量が、移動中の振動ローラの GPS 測位(RTK-GPS)データによってどの程度計測することができるかを確認することである。このため、実験ヤード(20m×28m)内にマーキングした 15 箇所で、一般に沈下量計測で用いられる光学式レベル計による水準測量データと、走行中の GPS データの中から測点の平面座標値に最も近い計測点の標高データとを比較し、評価する方法を採った。なお、レベル計測は、締固め面の細かい凹凸を考慮して各マーキング個所及びその周囲 4 点に対して行い、この 5 点の平均値を当該計測点の測量データとした。

表 5.5 に現場実験時の条件、図 5.28 に実験範囲とレベル計測点及び振動ローラの走行軌跡の関係を撒き出し厚 60cm 実験時の例で示す。

図 5.29 は実験状況であり、振動ローラには GPS 受信機等機材を搭載している。また、図 5.30 は光学式レベル計でのレベル測量の状況である。レベル計測は撒出し直後及び締固め回数毎(2, 4, 8, 12, 16 回)に実施した。

表 5.5 実験条件

試験エリア	20m×28m
材料	硬岩
撒き出し厚	30, 60, 100cm
締固め回数	16 回
締固め機械	酒井重工 SV-160DV (起振力 35t)
GPS 装置	トプコン DX-1
レベル測量	ソキア B20 自動レベル

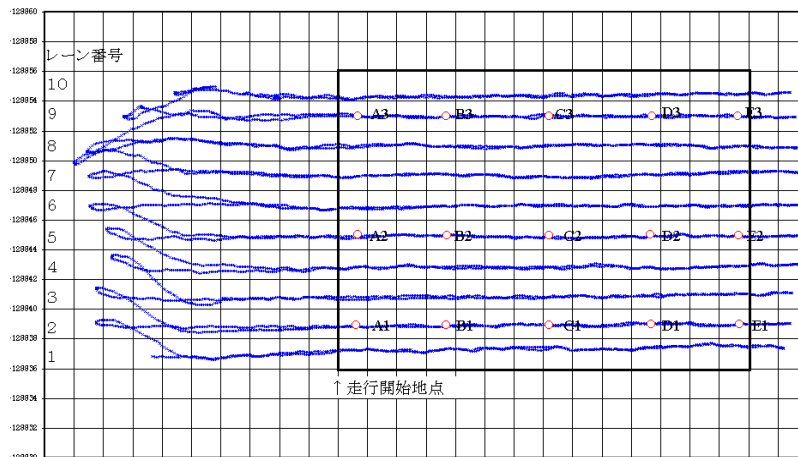


図 5.28 レベル計測点と振動ローラの走行軌跡例(撒出し厚 60cm 時)



図 5.29 実験時締固め作業状況



図 5.30 光学式レベル計での測量状況

なお、機器設置の制約上、位置計測点としての GPS アンテナは図 5.29 に示すように振動ローラの運転室の屋根上面に置いたが、光学レベルと整合させるため高さデータ取得時の水平データ(軌跡データ)は、下記のように起振部中央位置に座標変換した。

<参考>

GPS のアンテナは運転室上部に取り付けているため、ローラ部からは 1.5m 程度離れている。そのため、施工ヤード内での振動ローラの走行方向の傾きは微小であると仮定して、軌跡データから走行方向に 1.5m だけ一律にずらす事によって対応した(図 5.31 参照)。

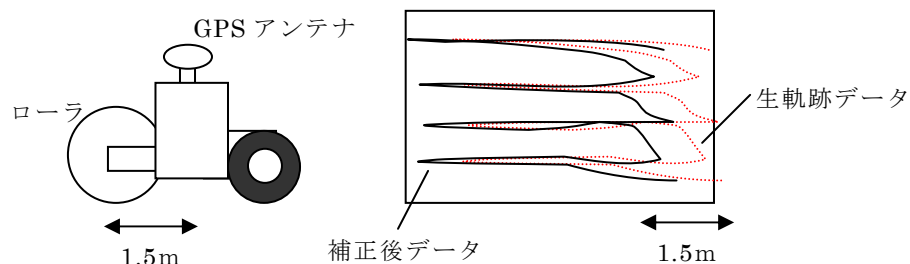


図 5.31 走行データの補正イメージ

5.4.3 実験結果と考察

(1) 走行軌跡

図 5.32 から図 5.34 に締固め回数の違いによる振動ローラの走行軌跡を例示する。計測作業のため、停止しながらの操作であったが、ほぼ一定のルートで走行できたことが分かる。これによって、過不足のない締固めを確認でき、実験データの信頼性を確保した。

なお、図 5.32 は沈下計測の基準データを採取するために、起振力をかけずに走行したときのデータを『0 回転圧』として示すものである。

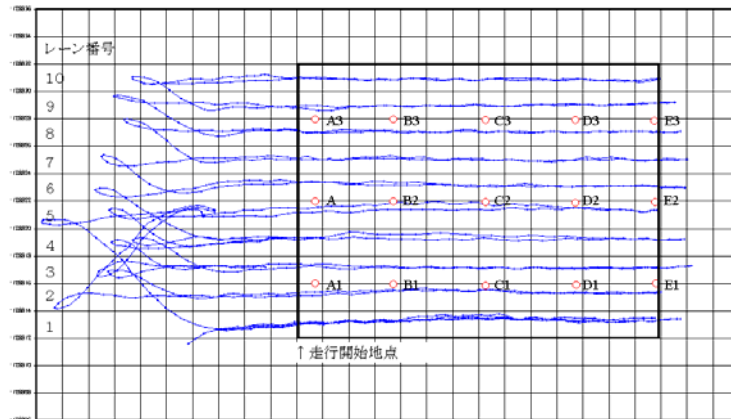


図 5.32 0 回転圧時の走行軌跡例

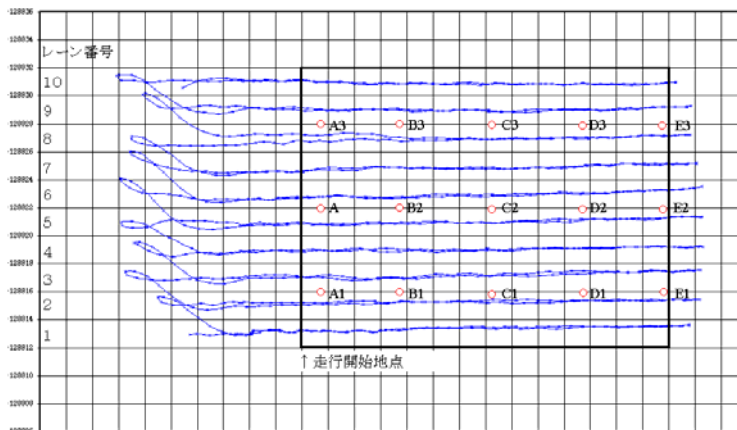


図 5.33 2 回転圧時の走行軌跡例

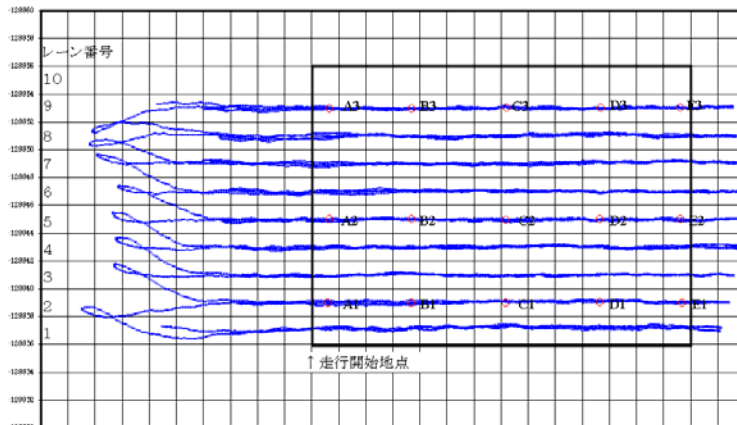


図 5.34 12 回転圧時の走行軌跡例

(2) 光学レベルと走行中の標高データとの相関

RTK-GPS の鉛直方向の精度は、水平方向の精度の 1.5～2 倍悪く、標準偏差で約 30～50 mm 程度とされている。すなわち、GPS データの一つ一つはその程度のバラツキを持っていることになり、締固めによる沈下量データが数 cm であることを考えれば、GPS の標高データをそのまま沈下データとして採用することは困難である。しかし、GPS では 1 秒毎に 3 次元位置データが計測されるため、走行速度が 4km/秒の時は、1m 毎に 1 データ取得することが出来る。このため、ある程度の領域が均一地盤と仮定できれば、その領域内の複数のデータが使えるので、それらの平均を採ることによって、バラツキを抑制することができると考えられる。

この考え方は、GPS と光学レベルの計測値に高い相関があることが前提となるため、実験時のそれぞれによって計測された高さデータを比較した。

図 5.35～図 5.37 に撒出し厚さ 30cm, 60cm, 100cm 時の GPS と光学式レベル計による標高データの関係を示す。図 5.38 はそれら 3 ケースのデータを全て合わせたものである。

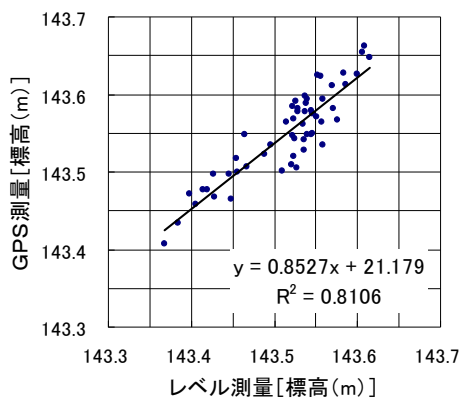


図 5.35 各測点における GPS と光学式レベル測量の関係(撒出し厚 30cm)

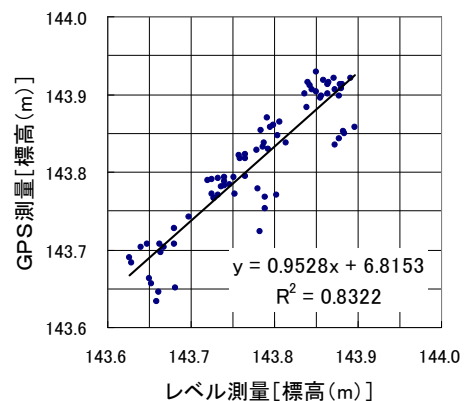


図 5.36 各測点における GPS と光学式レベル測量の関係(撒出し厚 60cm)

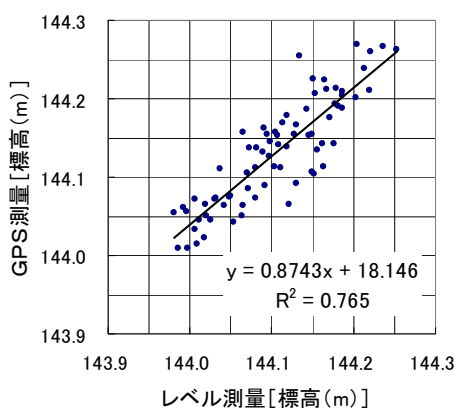


図 5.37 各測点における GPS と光学式レベル測量の関係(撒出し厚 100cm)

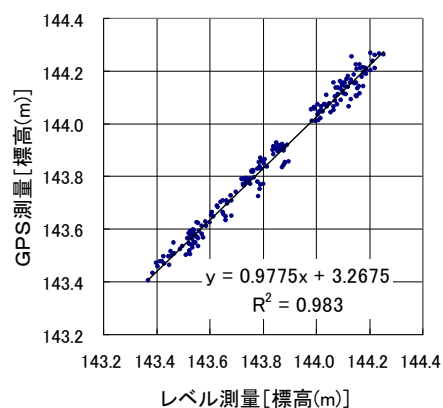


図 5.38 各測点における GPS と光学式レベル測量の関係(全データ)

図 5.35～図 5.37 からレベル測量データと GPS データを比較すると、全ての実験ケースで、高い相関関係はあるが数 cm 程度の誤差が生じていることが分かる。実験データを合計(約 200

点)した図 5.38 をみると、寄与率(R^2)がきわめて高い値となっている。これはデータ数が増加したことによって誤差が相殺されたことによるものと考えられる。一方、両者は同じ測量地点の標高を測定しているので $Y=X$ の関係が成立しなければならない。厳密な考察は難しいが、現実には走行中に得られた GPS データは光学レベル測定地点の近傍の点のデータであり、測点の標高とは異なる。このため今回の測定数では、回帰式の傾斜が 1 にはならなかったと考えられる。

結論的には、図 5.35～図 5.38 から、多数のデータを用いれば、レベル測量と同等の計測能力が期待できると考えられる。一方、微小な沈下量を詳細に計測するツールとしては、データのバラツキが小さいとはいえないことも分かる。

(3) 沈下量データの比較

図 5.39、図 5.40 にそれぞれ光学レベルと GPS での計測値から求めた沈下量データを示す。

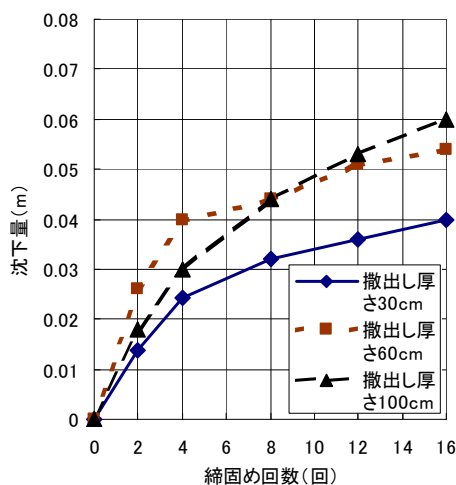


図 5.39 締固め回数毎の沈下量(光学レベル)

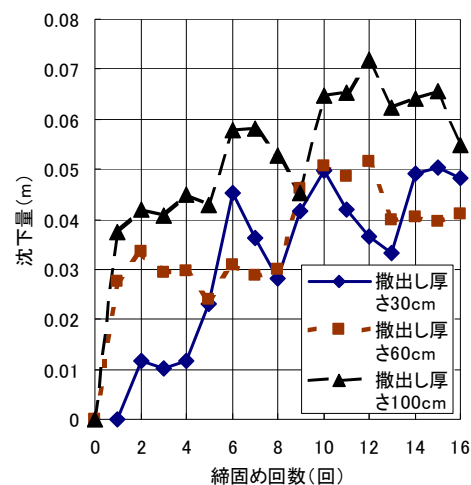


図 5.40 締固め回数毎の沈下量(GPS)

図 5.39、図 5.40 からは、レベル測量値から求めた沈下量に比べ GPS データによる沈下量が、データのバラツキによって不連続な変化を示していることが分かり、同一地点の沈下量を正確に計測することの困難さを示している。しかし、全体的には締固め回数の増加によって沈下量も増大していることは計測出来ており、特に締固め回数 1, 2 回時の最も沈下量が大きい時点の傾向は、ほぼレベル測量と一致している。

以上のことから、個々の計測データの精度に問題は残るが、GPS による沈下量計測によって盛土全体をマクロ的に評価できる可能性があるということが分かった。

やはり現状の GPS による鉛直方向の計測精度では、4～6cm という沈下量計測に適用することは難しいことが分かった。しかし、現状でもマクロ的には沈下の傾向をつかむ可能性があることも把握できた。

GPS 等測位精度向上という根本的な課題も残るが、将来性は高く、GPS だけで締固め回数管理のみならず、土質品質合わせて評価できるこの管理方法の実現性に向けて検討を行っていきたい。

5.5 規定転圧回数の合理的な更新方法

5.5.1 規定転圧回数の更新の必要性

盛土締固め管理システム(施工規定方式)では、事前に締固めに関するモデル施工(転圧試験)を行って、遵守すべき施工方法(敷均し機種、敷均し厚、転圧機種、転圧回数など)を決定するとともに、施工中には所定頻度で盛土材の材料試験を行い、盛土材が以前と異なる(性状が変化した)と判断した場合には、モデル施工を実施し直して、転圧回数などの施工方法を見直すことが前提である。

大規模な造成工事では、盛土材の採取場所(土取場)が一般に広大であり、複数箇所に分散している場合も多い。このため、工事費積算上の盛土材区分(例えば、「土砂・風化土」、「軟岩Ⅰ」、「軟岩Ⅱ」、「礫質土」等)のうえでは同一の盛土材であっても、採取地点によって粒度や含水比など、締固め効果を左右する物理的性状が空間的に大きく変化することが珍しくない。さらに、含水比に関しては、場所は同じでも、季節変動や降雨に伴う時間的変動もある。したがって、本来、盛土締固め管理システムの適用に当っては、施工期間中にモデル施工を何度も繰返し実施することを覚悟しなくてはならない。その代わり、品質方式における締固め度 D_c 値などの盛土品質の確認測定を省略、もしくは大幅に頻度低減できる。

しかしながら、モデル施工は、実施場所の確保・整地、試験実施に伴う費用や、工事中断による工程遅延など、発注者・施工者双方に負担が伴うことから敬遠されがちであり、工事着手時を除いて、必ずしも十分な頻度で行われていないケースが多い。そのような場合、施工後に乾燥密度などの品質指標を測定する従来の品質規定方式を省略することができない。これでは盛土締固め管理システムを導入した分だけ施工者の負担が増すことになり、本末転倒である。このような矛盾をもたらしている要因の1つは、モデル施工の負担の大きさである。そこで本研究では、モデル施工を簡便な室内試験によって再現し、室内試験をモデル施工の代用として用いる方法を提案した。以下では、今回新たに考案した、本来モデル施工によって定める規定転圧回数を、R.R. Proctor を始祖とする突固め試験法³⁾を応用した室内突固め試験(模擬転圧試験)によって決定する実用的な方法について述べる。

5.5.2 室内突固め試験を利用した規定転圧回数更新の可能性検討

室内突固め試験をモデル施工の代用として用いるためには、両者の突固め仕事量の関係を検討する必要がある。すなわち、室内突固めにおける突固め仕事量、例えば JIS A 1210 の A 法または B 法による供試体の単位体積当り突固め仕事量(約 550 kJ/m³; 以下、1Ec と記す)が、特定の施工条件(土質、敷均し厚、施工機械)のもとで転圧回数何回と同等の締固め効果を有するかを明らかにしておく必要がある。このような現場転圧回数と室内突固め仕事量の対比は、いくつかの既往研究⁴⁾において試みられている。

盛土締固め管理システムへの利用を想定したものではないが、畠ら⁵⁾および建山⁶⁾は室内

突固め試験のレベルで現場のモデル施工を再現することを目的として、自然含水比状態の砂質ロームを対象に、現場転圧回数と室内突固め仕事量の対比を体系的に行った。室内突固めは、JIS A 1210 の A 法または C 法に用いられる 10 cm モールド内で実施された。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 室内突固め試験によって現場のモデル施工を再現可能である。
- 2) 現場の施工条件(敷均し厚、転圧機種など)に応じて適切なランマー質量・落下高さを
用いれば、現場における転圧回数 N により得られるのと同等の締固め効果(乾燥密度)
が、 N を m 倍(m は定数)した室内突固め回数 $N^*=m \cdot N$ によって再現できる(記号は原著
のまま)。

しかし、実施工における盛土材の敷均しは、ブルドーザにより前進・後退を繰返しながら所定の層厚に調整することが多い。敷均し機械の反復走行による締固め効果は、転圧機械(ローラ等)による締固め効果と比較して無視できない程度に大きい場合があることが、経験的に知られている。言い換えれば、室内突固め試験においてモールドにスコップで試料を投入した時の初期乾燥密度と、モデル施工(通常の施工でも同様)における転圧開始前(敷均し完了後)の乾燥密度を比較すると、両者は一般に異なると考えられる。このため、現場における転圧回数 N と室内突固め回数 N^* の効果を比例関係により対比することは、必ずしも適切と思われない。畠ら⁵⁾および建山⁶⁾の方法は、その先見性と先駆性が高く評価されるべきものであるが、上記の点に関して、工事への実適用に支障が生じるおそれがある。

5.5.3 室内突固めによるモデル施工シミュレーション(模擬転圧試験)の提案

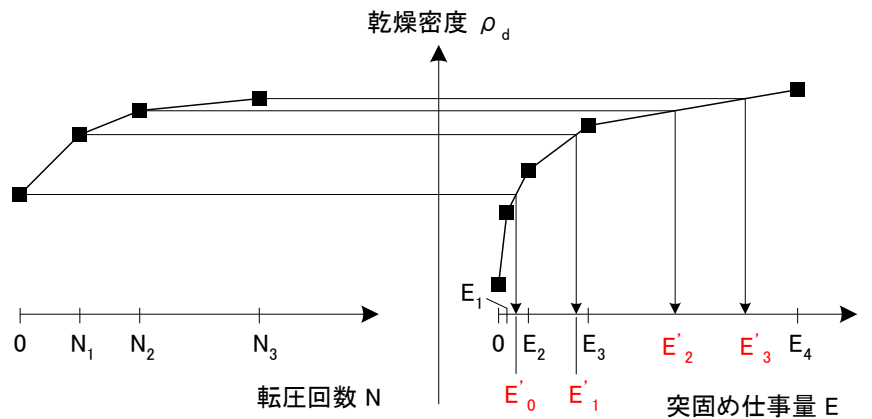
ブルドーザやローラなどの実機による現場の締固め機構と、モールドとランマーを用いた室内突固め試験のそれとは異なるが、突固め試験(JIS A 1210)が、実機による締固め効果を予測するための事実上唯一の室内試験法として普及している。この現状に鑑み、かつ、畠ら⁵⁾および建山⁶⁾に倣って、提案する室内突固め試験(模擬転圧試験)においては、突固め試験(JIS A 1210)の試験用具を流用するとともに、突固め方法も可能な限り踏襲した。模擬転圧試験の考え方は吉田ら⁷⁾の方法を基本としているが、本研究では、実務への適用性をより高めるために修正した。以下に、模擬転圧試験の試験方法と施工への適用方法を、実施手順に従って説明する。なお、以下の説明では、砂質土を念頭に、締固め効果の指標として乾燥密度 ρ_d を用いるが、他の指標でも構わない。実施工における実際の管理対象となる指標を用いるべきであり、粘性土の場合は空気間隙率 V_a やコーン指数 q_c などが適切である。

(1) モデル施工時(室内突固め仕事量と現場転圧回数の対比)

本研究の立場は、あくまで盛土締固め管理システムの適用推進にある。すなわち、工事途

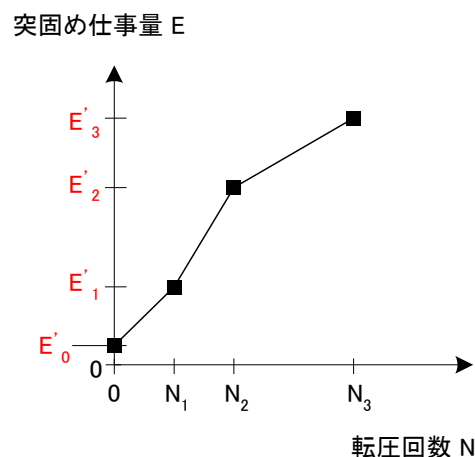
中におけるモデル施工の度重なる実施の必要性を解消することを目的としているが、工事着手時におけるモデル施工は必要と考えており、着手時のモデル施工を廃することは意図していない。すなわち、工事着手時には、これまで同様モデル施工を実施して規定転圧回数を決定するものとする。

工事着手時におけるモデル施工は、盛土材別に、施工機械（敷均し機械・転圧機械）の組合せや施工層厚などを変えて複数の施工条件で行うことが多い。以下では、ある1種類の盛土材に対して、モデル施工の結果採用された、標準的な施工方法（施工機械および施工層厚）を考える。この施工方法におけるモデル施工結果（転圧回数 N と乾燥密度 ρ_d の関係）を模式的に図 5.41(a)に示す。同図では、転圧回数を N_1, N_2, N_3 の3水準としている。 N_1, N_2, N_3 は、例えば、それぞれ 4, 8, 16 回などのように設定されるが、水準数を含め、現場の条件に応じて任意に設定することができる。



(a) モデル施工

(b) 室内突固め(模擬転圧試験)



(c) モデル施工と室内突固めの対比

図 5.41 モデル施工における室内突固め回数と現場転圧回数の対比(模式図)

これに対し、モデル施工と同一の盛土材を用いて、室内突固め(模擬転圧試験)を実施する。

一般的な突固め試験 (JIS A 1210) では、図 5.42 に示すように、材料の含水比を 5～6 水準程度に調整してそれぞれ突固めを行い、含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係 (締固め曲線) を求め、最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} を求める。これに対し、模擬転圧試験では試料の含水比調整を行わない。すなわち、モデル施工と同じ自然含水比の試料を用い、図 5.41(b) に模式的に示すように、ランマーによる突固め仕事量 E を数段階に変化させて、それぞれ突固めを行う。同図では突固め仕事量を E_1, E_2, E_3, E_4 の 4 水準としているが、これらはそれぞれ、例えば $0.1Ec, 0.3Ec, 1Ec, 4.5Ec$ とする。ここに、 $1Ec$ とは前述のとおり JIS A 1210 の突固め方法 A,B 法に規定される供試体の単位体積当り突固め仕事量 (約 550 kJ/m^3)、 $4.5Ec$ は C,D,E 法の突固め仕事量 (約 $2,500 \text{ kJ/m}^3$) である。突固め仕事量 E は、その水準数を含め、任意に設定することができ、JIS A 1210 の突固め試験と同様に式 (5.1) により算定される。

突固め仕事量: $1Ec$ または $4.5Ec$

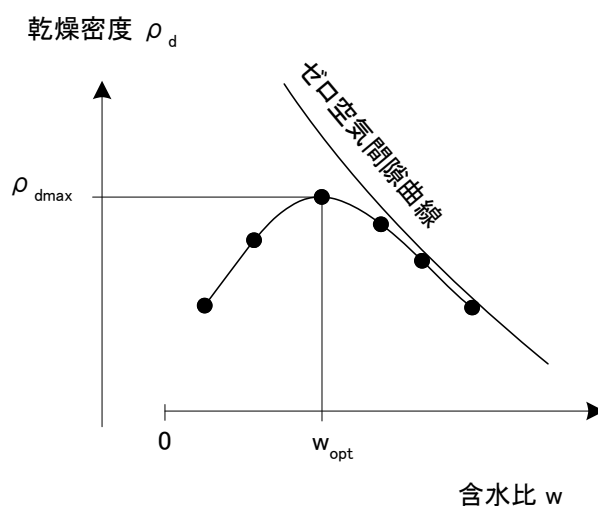


図 5.42 JIS の突固め試験から得られる締固め曲線 (模式図)

$$E = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \quad (5.1)$$

ここに E : 突固め仕事量 (kJ/m^3)

W_R : ランマーの重量 (kN)

H : ランマーの落下高 (m)

N_B : 1 層当りの突固め回数 (回)

N_L : 層の数 (層)

V : モールドの容積 (m^3)

W_R, H, N_L および V が一定の場合には、図 5.41(b) の横軸および同図(c) の縦軸を、 E に替えて 1 層当りの突固め回数 N_B としてもよい。

模擬転圧試験における具体的な突固め方法の例を表 5.6 に示す。ここに、一般的な JIS A 1210 の突固め試験法も併せて示している。JIS の場合は表 5.6 (1)に示す 5 種類の突固め方法 (A～E 法)から 1 つを選択し、含水比の異なる数種類の試料を単一の方法で突固める。対照的に、模擬転圧試験では、試料の含水比は自然含水比 1 種類のみであるが、表 5.6 (2)または (3)のように突固め仕事量が 0Ec, 0.1Ec, 0.3Ec, 1Ec, 4.5Ec などのように異なる数種類の突固め方法を用いる。

表 5.6 突固め方法

(JIS A 1210 の規定および模擬転圧試験における設定例)

(1) JIS A 1210の突固め方法

呼び名	ランマー質量	重力加速度	ランマー重量 W_R	落下高さ H	1層の突固め回数 N_B	層の数 N_L	モールド容積 V	突固め仕事量 E	仕事量の比 (A法=1)	仕事量の比 (B法=1)
	kg	m/s^2	N	cm			cm^3	kJ/m^3		
A法	2.5	9.80665	24.5	30	25	3	1000	551.6	1.00	1.00
B法	2.5	9.80665	24.5	30	55	3	2209	549.4	1.00	1.00
C法	4.5	9.80665	44.1	45	25	5	1000	2482.3	4.50	4.52
D法	4.5	9.80665	44.1	45	55	5	2209	2472.2	4.48	4.50
E法	4.5	9.80665	44.1	45	92	3	2209	2481.2	4.50	4.52

(2) 模擬転圧試験 (10 cmモールドを使用する場合)

呼び名	ランマー質量	重力加速度	ランマー重量 W_R	落下高さ H	1層の突固め回数 N_B	層の数 N_L	モールド容積 V	突固め仕事量 E	仕事量の比 (A法=1)	仕事量の比 (B法=1)
	kg	m/s^2	N	cm			cm^3	kJ/m^3		
0Ec	2.5	9.80665	24.5	30	0	3	1000	0.0	0.00	0.00
0.1Ec	2.5	9.80665	24.5	10	6	3	1000	44.1	0.08	0.08
0.3Ec	2.5	9.80665	24.5	30	6	3	1000	132.4	0.24	0.24
1Ec (A法)	2.5	9.80665	24.5	30	25	3	1000	551.6	1.00	1.00
4.5Ec	2.5	9.80665	24.5	30	112	3	1000	2471.3	4.48	4.50

(3) 模擬転圧試験 (15 cmモールドを使用する場合)

呼び名	ランマー質量	重力加速度	ランマー重量 W_R	落下高さ H	1層の突固め回数 N_B	層の数 N_L	モールド容積 V	突固め仕事量 E	仕事量の比 (A法=1)	仕事量の比 (B法=1)
	kg	m/s^2	N	cm			cm^3	kJ/m^3		
0Ec	4.5	9.80665	44.1	45	0	3	2209	0.0	0.00	0.00
0.1Ec	4.5	9.80665	44.1	15	7	3	2209	62.9	0.11	0.11
0.3Ec	4.5	9.80665	44.1	45	7	3	2209	188.8	0.34	0.34
1Ec	4.5	9.80665	44.1	45	20	3	2209	539.4	0.98	0.98
4.5Ec (E法)	4.5	9.80665	44.1	45	92	3	2209	2481.2	4.50	4.52

模擬転圧試験に用いるモールドやランマーなどの突固め用具は、実務における利便性を重視する立場から、JIS A 1210 の規格品を流用し、落下高さなどの突固め方法もできるだけ JIS を踏襲した。モールドは、試料の粒度に応じて JIS A 1210 に規定されている 10 cm モールドと 15 cm モールドを使い分けることとした。すなわち、10 cm モールドおよび 15 cm モールドの許容最大粒径をそれぞれ 9.5 mm, 37.5 mm とする。試料が粒径 37.5 mm 以上の礫や石を含む場合には、これらを除去したうえで 15 cm モールドを使用する。この場合、図 5.41 (b)のように得られた室内突固め結果を、同図(a)のモデル施工結果と比較するには、Walker-Holtz の方法⁸⁾などによって、除去した礫分の含有率(礫率)や礫の絶乾密度などに応じて乾燥密度 ρ_d を補

正する必要がある。

図 5.41(a)および(b)が得られたら、引続いて両者を比較して、モデル施工における転圧回数 N と、模擬転圧試験における突固め仕事量 E の対応付けを行う。つまり、モデル施工における転圧回数 $N_i (i=1,2,\dots)$ が、それぞれ模擬転圧試験における突固め仕事量のいかなる値と同等の締固め効果を有するかを調べる。何をもって「締固め効果が同等」と見做すかについては、前述のとおり選択の余地があるが、ここでは代表例として乾燥密度 ρ_d を用いる。すなわち、図 5.41 (a)における転圧回数 $N_i (i=1,2,\dots)$ と同一の乾燥密度 ρ_d を与える突固め仕事量 $E'_i (i=1,2,\dots)$ を、図 5.41(b)の関係を用いて、補間(按分)により求める。これにより、図 5.41(c)に模式的に例示するように、現場転圧回数 N と室内突固め仕事量 E との関係図が得られる。

これとは逆に、図 5.41(b)における突固め仕事量 $E_i (i=1,2,\dots)$ と同一の乾燥密度 ρ_d を与える転圧回数 $N'_i (i=1,2,\dots)$ を、図 5.41(a)から求めることによっても、図 5.41(c)の関係が得られる。また、図 5.41(a),(b)は実測値による折れ線により表しているが、双曲線などによる近似曲線を用いることにより、データ点数が少ない場合の精度向上や、ばらつきの影響の低減を図る提案もある^{5),6)}。

提案手法では、盛土材の締固め特性が若干変化しても、施工方法(敷均し機種、敷均し厚、転圧機種)が一定である限り、図 5.41(c)の現場転圧回数 N と室内突固め仕事量 E との関係は不変と仮定する。この仮定の根拠と妥当性は 5.5.5 に示す。

(2) 本施工時(転圧回数の妥当性検証)

前述のモデル施工においては、従来、通常の実験(JIS A 1210)を同時に実施して、最適含水比とともに最大乾燥密度 ρ_{dmax} を求め、盛土の乾燥密度 ρ_d と ρ_{dmax} の比である締固め度 D_c 値が一定値以上(一般的には 90%以上)となるように、本施工における規定転圧回数 N_{req} を定めるのが普通である。しかしながら、工事着手後に、盛土材の締固め特性の変化に遭遇すると、乾燥密度の要求(例えば $D_c \geq 90\%$)を実現するうえで、前述の転圧回数が当初の N_{req} では過不足が生じるおそれがある。そこで、模擬転圧試験を行うことによって、当初の規定転圧回数 N_{req} の妥当性を検証する。

この場合も、模擬転圧試験はモデル施工時と同様に、現在施工中の盛土材すなわち自然含水比の試料を突固める。すなわち、図 5.41 の例を引継いで説明すれば、図 5.41(b)と同じ突固め仕事量 $E_i (i=1,2,\dots)$ の組合せを用いて室内突固め(模擬転圧試験)を行い、図 5.43(b)のようにそれぞれ乾燥密度 ρ_d を求める。図 5.41(c)の転圧回数 N_i と突固め仕事量 E_i との関係は、盛土材の締固め特性が若干変化しても、施工方法(敷均し機種、敷均し厚、転圧機種)が一定である限り不変と考えるので、モデル施工時に図 5.41(b)において各転圧回数 $N_i (i=1,2,\dots)$ に対比された突固め仕事量 $E'_i (i=1,2,\dots)$ に対応する乾燥密度 ρ_d を図 5.43(b)から読み取り、これを図 5.43(a)のように、転圧回数 $N_i (i=1,2,\dots)$ に対してプロットすれば、現在の材

料に対する転圧回数 N と乾燥密度 ρ_d の関係の推定曲線が得られる。すなわち、モデル施工を行わずに、その結果を予測することができる。

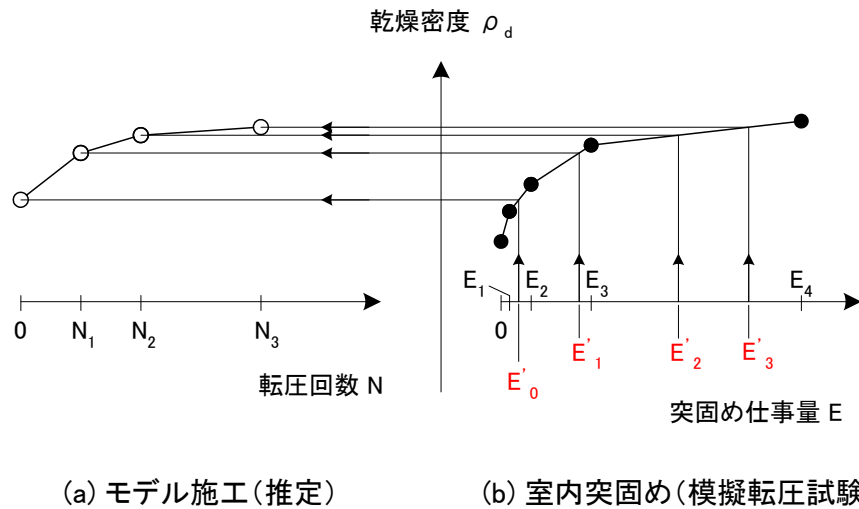


図 5.43 施工中における室内突固め回数と現場転圧回数の対比(模式図)

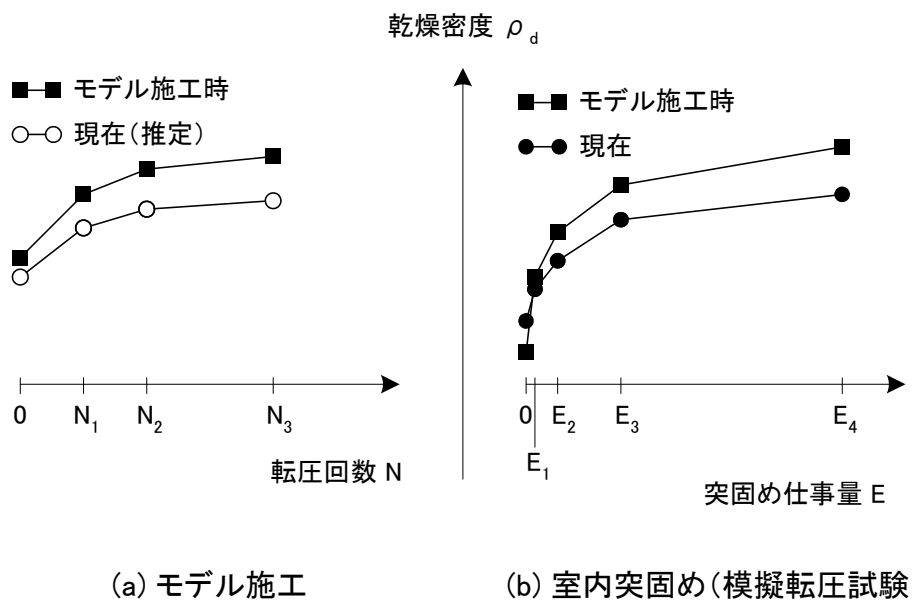


図 5.44 乾燥密度による室内突固め回数と現場転圧回数の対比

図 5.44 は、図 5.41(a),(b)及び図 5.43(a),(b)を重ねて描いたものであるが、盛土の品質管理における合否判定のための規格値として、乾燥密度 ρ_d そのものが用いられることは少ない。すなわち、規格値は ρ_d と JIS の突固め試験(図 5.42)から求めた最大乾燥密度 ρ_{dmax} との比である締固め度 $D_c = \rho_d / \rho_{dmax}$ によって規定されるのが一般的である。そこで、図 5.45 のようにモデル施工時および現在において JIS の突固め試験を行って、それぞれの最大乾燥密度(ρ_{dmax})₀ および ρ_{dmax} 'を求めることにより、図 5.44(a)(b)の縦軸を締固め度 D_c として描き換えたものが図 5.46 である。

突固め仕事量: $1E_c$ または $4.5E_c$

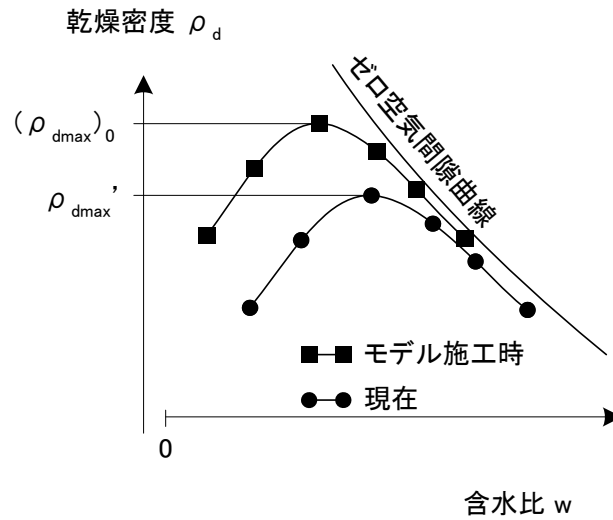
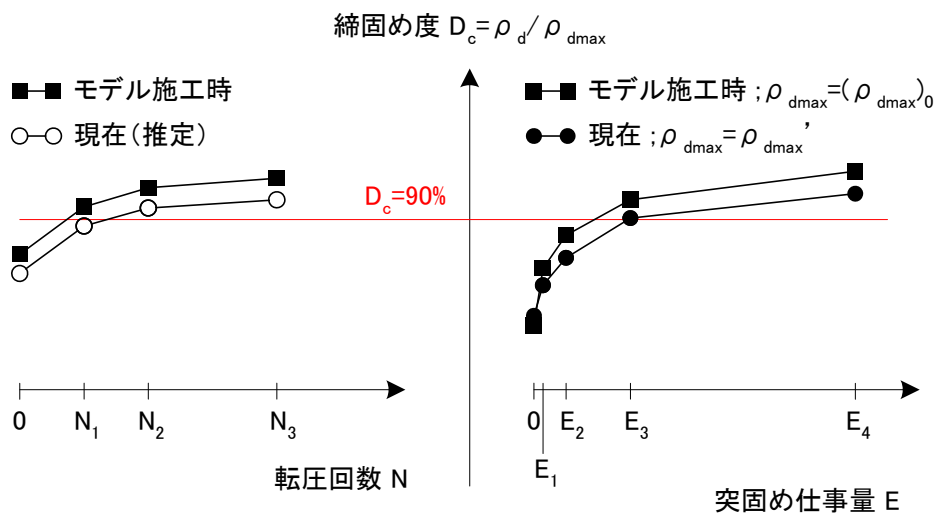


図 5.45 JIS の方法による突固め試験結果 (模式図)



(a) モデル施工

(b) 室内突固め (模擬転圧試験)

図 5.46 締固め度による室内突固め回数と現場転圧回数の対比

図 5.46(a)において、モデル施工の結果(■印)から、締固め度 D_c の規格下限値(90%)を侵すことのないように規定転圧回数 $N_{req}=N_1$ (例えば $N_1=4$ 回)と決定され、現在もこの N_{req} が変更されずに用いられているとする。しかしながら、現場での現在の盛土材を用いて模擬転圧試験を行い(図 5.46(b)の●印)、モデル施工結果を推定した結果、図 5.46(a)の○印のようになるとすれば、転圧回数 N_1 では規格値を満足できないため、規定転圧回数 N_{req} を N_1 から N_2 へ変更する必要があると解釈される。以上のような方法によって、工事期間中に、適切な頻度で模擬転圧試験を繰り返し実施し、都度、規定転圧回数 N_{req} を見直すならば、盛土締固め管理システ

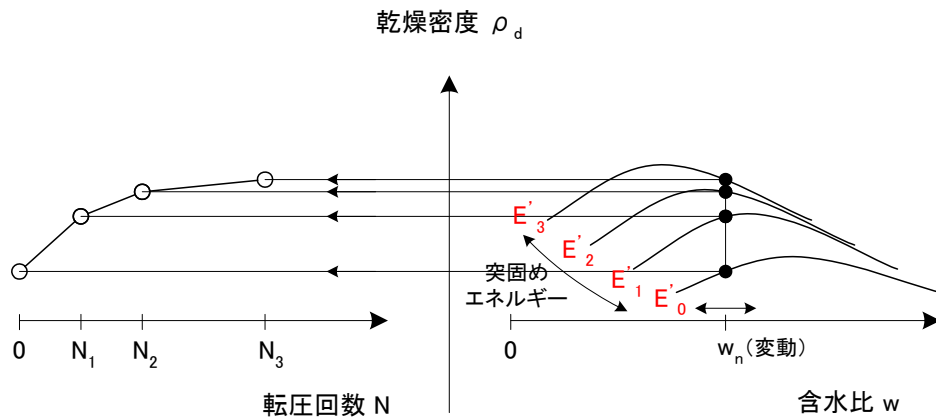
ムの適用にあたって、規格値割れの可能性を大幅に低減することができ、盛土上における密度測定などの品質管理試験の省略または大幅な削減が可能となる。そうして初めて、盛土締固め管理システムの本来のメリットが活かされる。

図 5.46 の例とは逆に、当初から用いていた規定転圧回数 N_{req} が過大と判断される場合も起こり得る。その場合、規定転圧回数 N_{req} を減らすことが可能である。ただし、規定転圧回数 N_{req} の頻繁な変更は現場を混乱させるおそれがあることから、規定転圧回数 N_{req} をあえて変更しないという選択肢もある。

以上、盛土の締固め効果の指標として乾燥密度 ρ_d (または締固め度 D_c 値) を例にとりて提案手法を説明したが、空気間隙率 V_a やその他の指標 (コーン指数 q_c など) も、同様に扱うことができる。空気間隙率 V_a は、転圧回数や突固め仕事量の増加に伴って減少するが、取扱い方法は同様である。空気間隙率 V_a やコーン指数 q_c の場合、これらによって直接に管理基準を定めれば (例えば $V_a \leq 15\%$)、乾燥密度 ρ_d (図 5.44) から締固め度 D_c 値 (図 5.46) に変換するような処理は不要である。

5.5.4 含水比のみが変化する可能性がある場合の便法

前述したように、締固め効果を左右する物理的性状の変化としては、土取場の移動に伴う空間的変動のほか、季節変動や降雨に伴って含水比のみが変化する時間的変動がある。後者の事態のみが予測される場合には、工事着手後における模擬転圧試験の実施を省略することができる (モデル施工時の模擬転圧試験は必要)。すなわち、モデル施工の段階で、図 5.41(b)において転圧回数 $N_i (i=1, 2, \dots)$ と同等の突固め仕事量 $E'_i (i=1, 2, \dots)$ を求めるとともに、この $E'_i (i=1, 2, \dots)$ について、図 5.47b) のように、それぞれ含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係 (いわゆる締固め曲線) を求めておく (模擬転圧試験の事前実施に相当)。ここに、突固め仕事量 $E'_i (i=1, 2, \dots)$ は、1 層当りの突固め回数 N_B やランマー落下高さ H を調整することによって得られる。工事着手後には、当日の施工含水比 (通常は自然含水比 w_n) を測定して、図 5.47(b) の各締固め曲線において含水比が w_n のときの締固め度 D_c 値を読取れば、各突固め仕事量 $E'_i (i=1, 2, \dots)$ に対する締固め度 D_c が得られる。これらを図 5.43(a) を求めるときと同様に、図 5.47(a) のように転圧回数 $N_i (i=1, 2, \dots)$ に対してプロットすれば、転圧回数 N と乾燥密度 ρ_d の関係の推定曲線となる。



(a) モデル施工(推定)

(b) 室内突固め(模擬転圧試験)

図 5.47 含水比のみが変化する場合における転圧効果の推定

5.5.5 模擬転圧試験における仮定条件の検討

先に述べたように、提案手法では、盛土材の締固め特性が若干変化しても、施工方法(敷均し機種、敷均し厚、転圧機種)が一定である限り、図 5.41(c)の室内突固め仕事量 E と現場転圧回数 N の関係は不変と仮定する。この仮定の普遍性について、以下に考察する。

提案手法の模擬転圧試験は、JIS A 1210 の突固め試験用具を用いるものであり、試料が締固められるメカニズムは JIS と同様である。この場合、厳密に言えば、ランマーの落下仕事量として試料に与えられた仕事量の一部は摩擦熱、音波、モールドや試験室床に伝播する振動波となって消失するが、JIS A 1210 で仮定しているように、式(5.1)により供試体に与えられた突固め仕事量を評価することに、異存をもつ技術者は少ないと思われる。

他方、実施工においても、転圧機械による突固め仕事量は、施工完了した層の上に、新たに敷均された 1 層においてのみ消費されるとみなすことが、暗黙の前提となっている。この場合、締固め対象層に与えられる突固め仕事量 E_c は、式(5.1)から類推されるように、

$$E_c = f(F_m, T_L, N) \quad (5.2)$$

ここに E_c : 転圧機械による突固め仕事量

F_m : 転圧機械により与えられる仕事量で、機械の自重、起振力、転圧装置の幅などから決まる。室内突固めにおけるランマーの重量 W_m および落下高 H から決まる、ランマー突固め 1 回当たりの仕事量に相当するもので、その指標として、例えば振動ローラの動線圧が挙げられる。

T_L : 1 回の施工厚さ(仕上り厚)であり、室内突固めにおける、層の数 N_L とモールド容積 V の両要因を包含したものと考えられる。

N : 転圧回数であり、室内突固めにおける 1 層当りの突固め回数 N_B に相当する。

と表すことができよう。

さらに、先に述べたように、敷均し機械による締固め効果 E_s も存在し、式(5.2)と同じ形式で表せば、

$$E_s = f(F_{ms}, T_{Ls}, N_s) \quad (5.3)$$

ここに E_s : 敷均し機械による突固め仕事量

F_{ms} : 敷均し機械により与えられる仕事量で、機械の自重、履帯の断面形状・幅・長さなどから決まる。

T_{Ls} : 1回の施工厚さ(敷均し厚)で、便宜上、 $T_{Ls} = T_L$ (転圧後の仕上り厚)と考える。

N_s : 敷均し時の同一箇所の反復走行回数。

となり、以上から、転圧機械および敷均し機械による合計の突固め仕事量 E_{c+s} は、

$$E_{c+s} = f(F_m, F_{ms}, T_L, N, N_s) \quad (5.4)$$

と表すことができる。施工機械(敷均し機械および転圧機械)、1回の施工層厚 T_L 、敷均しの方法(同一箇所の反復走行回数 N_s)が一定の条件のもとでは、式(5.4)の突固め仕事量 E_{c+s} は転圧回数 N のみの関数になり、図 5.41(c)のように両者を結び付けることが可能となる。

転圧回数 N と突固め仕事量 E との関係を土質によらず一定と仮定するのも1つの考え方であるが、盛土材の呼称(「軟岩」、「礫質土」等)が異なれば、施工方法が異なるのが普通であることから、本研究では、 N と E の関係は、同一呼称の1種類の盛土材に対して一定と仮定する。

5.5.6 模擬転圧試験の適用性の検証結果

J 自動車道 I 工事において盛土材として用いられた破碎風化砂岩を対象に、モデル施工を工事着手時(材料A)および工事着手後(材料B)の2回実施した。施工方法は一定とし、敷均しに 7t 級ブルドーザ、転圧に 10t 級振動ローラを使用し、1層の仕上がり厚を 30cm とした。これら2回のモデル施工時に、それぞれのモデル施工と同一の盛土材を用いて、模擬転圧試験を実施した。盛土材の特性値を表 5.7 に示す。

表 5.7 盛土材の特性(J 自動車道 I 工事)

項 目			材料A	材料B
土粒子の密度	ρ_s	g/cm ³	2.667	2.682
自然含水比(現場RI測定)	w_n	%	10.0	12.9
粒度(全粒径)	最大粒径 D_{max}	mm	75	53
	37.5mm以上礫率	%	22.5	22.5 ※
	礫分	%	36	41
	砂分	%	43	34
	細粒分	%	21	25
分類	分類名		細粒分質礫質砂	細粒分質砂質礫
	分類記号		(SFG)	(GFS)
締固め (E-c法;礫補正後)	最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm ³	2.090	2.119
	最適含水比 w_{opt}	%	8.7	8.5

※材料Bでは礫率測定を行っていないため材料Aと同値を仮定した。

模擬転圧試験における突固め方法は、表 5.6 の「(3)15cm モールドを使用する場合」に示す 0Ec, 0.1Ec, 0.3Ec, 1Ec, 4.5Ec の 5 通りとした。

図 5.48 に、モデル施工および模擬転圧試験の結果を示す。

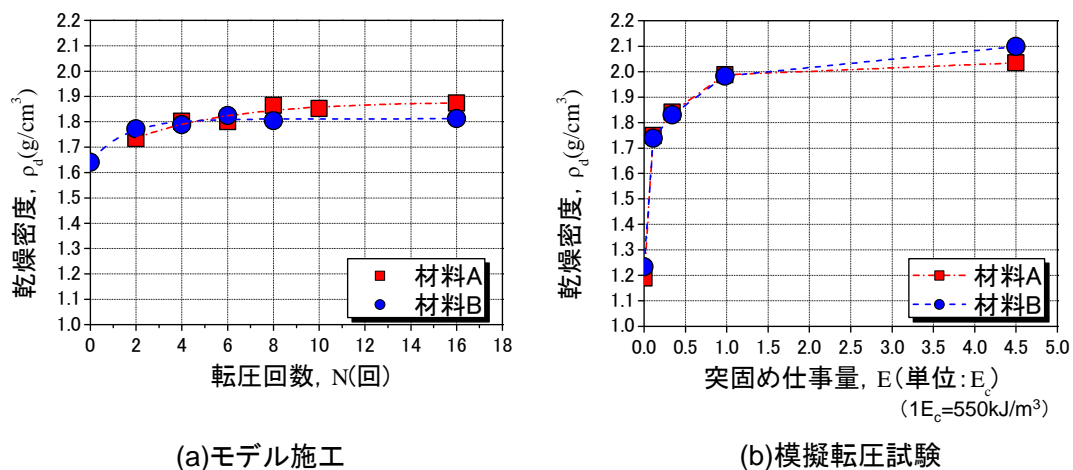
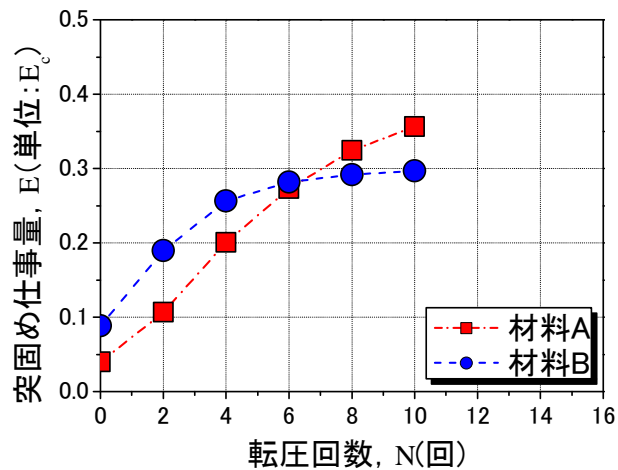


図 5.48 モデル施工および模擬転圧試験結果(J 自動車道 I 工事)

図 5.48 から、図 5.41 と同様の手順によって、転圧回数 N と突固め仕事量 E の関係を求めた(図 5.49)。図 5.49 によれば、両材料の転圧回数 N と突固め仕事量 E の関係はほぼ一致している。このことは、施工方法(仕様)が同一であれば図 5.41(c)の関係が不変であるとの仮定の妥当性を示していると考えられる。

図 5.49 転圧回数 N と突固め仕事量 E の関係(J 自動車道 I 工事)

5.5.7 まとめ

工事着手時を除いてモデル施工を行うことなく、工期中の任意時点において規定転圧回数の妥当性を検証する方法として、室内突固めによる模擬転圧試験を提案し、その有効性を実際のデータにより検証した。提案手法を用いることにより、盛土締固め管理システムの本来のメリットを活かした、合理的な盛土品質管理の確立が可能となる。そのために、今後のデータの蓄積により、提案手法のさらなる有効性の実証が望まれる。

5.6 締固め管理システムの山間部における適用性向上に関する検討⁹⁾

施工規定方式による盛土締固め品質管理システムの適用に際しては、RTK-GPS 測位の原理から刻々と位置が変化する GPS 衛星の観測が確実に行なえ、相対測位の基準点からのデータ伝送にも適した場所であることが基本条件である。すなわち、RTK 測位に必要な GPS 衛星（5 個以上）が捕捉できない場所、あるいは GPS 固定局からの通信が途絶える場所では、現状のシステムは対応できない。しかし、実際の工事現場で常時盛土ヤードの全域にわたって良好な条件を備えた場所が多いとは言えない。このため、計測データの欠落が生じることがあり、RI 等の従来管理方法の一時的使用が対応策として提案されているが、費用の増加、データ整理の煩雑化等が問題となっている。

本項では、システム適用範囲を広げると共に施工管理の効率化を図る上で解決しなくてはならないこの問題に対し、単独測位法の適用性を検討したのでその概要を記す。

5.6.1 補完方法の検討

測位データの欠落が生じる主要因は、次の 2 点である。

- ① RTK-GPS 測位法の必須である 5 基以上の衛星が地形や転圧機械の姿勢によって観測出来ない時がある。
 - ② 電波法上、空中線電力が小さく制限されるために受信機感度を最大限に増幅させ、弱い電波を最大限受信することによって伝送距離を伸ばす工夫を施している。一方で伝送データ容量が大きいために直進性は良いものの回折伝播しにくい特性を持つ、高い周波数帯の無線を使用せざるを得ないため、耐ノイズ性能が非常に低い。したがって、伝送地点間が見通せない場合や、転圧機械の姿勢や周囲の大型建設機械の配置状況等によって電波の反射が起きた場合に敏感に反応してしまい、電波障害現象となって、固定局－移動局間のデータ伝送にエラーが生じる場合がある。
- ①に対しては、現場地形や GPS 衛星の飛行スケジュール等によって測定出来ない時間とエリアが事前に判明するのでシステムの運用で対処が可能であるが、②に関しては、事前に予測することが困難であるため、別途対応策が必要である。

表 5.8 に移動体のリアルタイム測位に適用出来る GPS の利用形態を示す。

表 5.8 移動体測位可能な GPS の形態

GPS 利用形態		最低必要衛星数	データ伝送の要否	公称精度
RTK-GPS	フィックス値	5	要	1～5cm
	フロート値	4-5	要	数 10cm 以下
DGPS		4	要	数 10cm
単独測位		4	不要	数 m

この表から明らかなように測定のための必要人工衛星が少ないのは DGPS と単独測位法で

あり、固定局からのデータ伝送も不要なのは単独測位法だけである。2000年5月行われたSA解除により測位精度が飛躍的に向上したこともあり、データ補完方法としての単独測位法の適用性を確認するため、現場実験を行った。

5.6.2 単独測位の適用性検討実験

図5.50に実験時の機器構成を示す。この実験では、一つのGPSアンテナで受信した同一の電波を2台のGPS受信機に分岐し、RTK-GPS測位と単独測位の両方によって得られる転圧機械の移動中のデータを比較した。

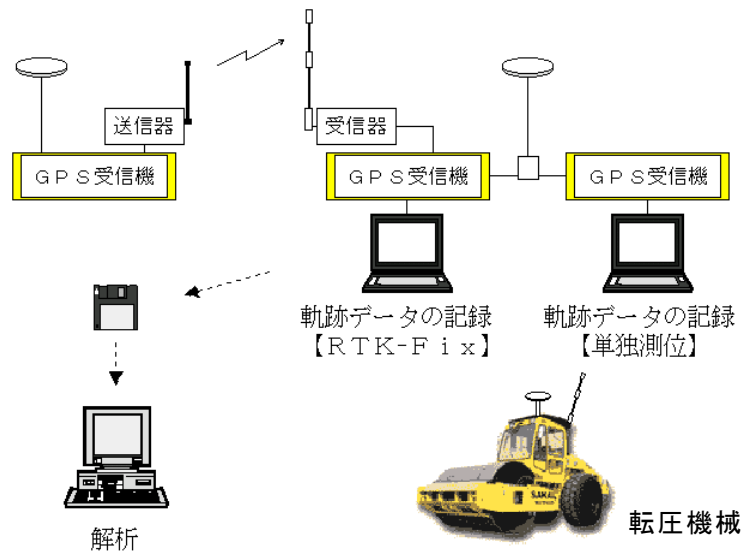


図 5.50 実験機器構成

5.6.3 実験結果と考察

図5.51にRTK-GPSデータ及び単独測位データでの走行軌跡を示す。現場内の盛土ヤード（約250×120m）を時速4～5kmで周回した約2時間のデータをもとに描いたもので、平面図としてはほぼ同じ形であることが分かる。RTK-GPSの値と単独測位データの差は、標準偏差で東西70cm、南北80cm、高さは125cmであった。

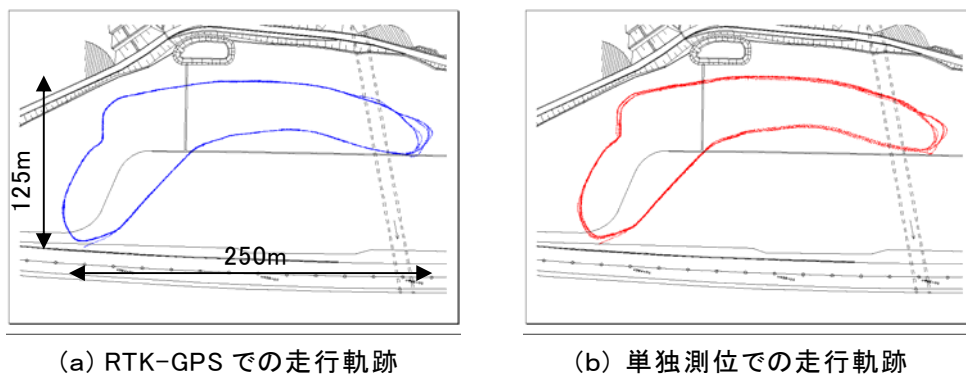


図 5.51 走行軌跡の比較

図5.52は締固め回数データに対する影響を見るために、締固め作業中の転圧機械（振動ロ

一ラ)の RTK-GPS と単独測位による走行データを表わしたものである。振動ローラの走行レーンを東西、南北とも5レーンを設定し、レーン毎に走行回数を変化させて、締固め回数の相違を観測したものである。

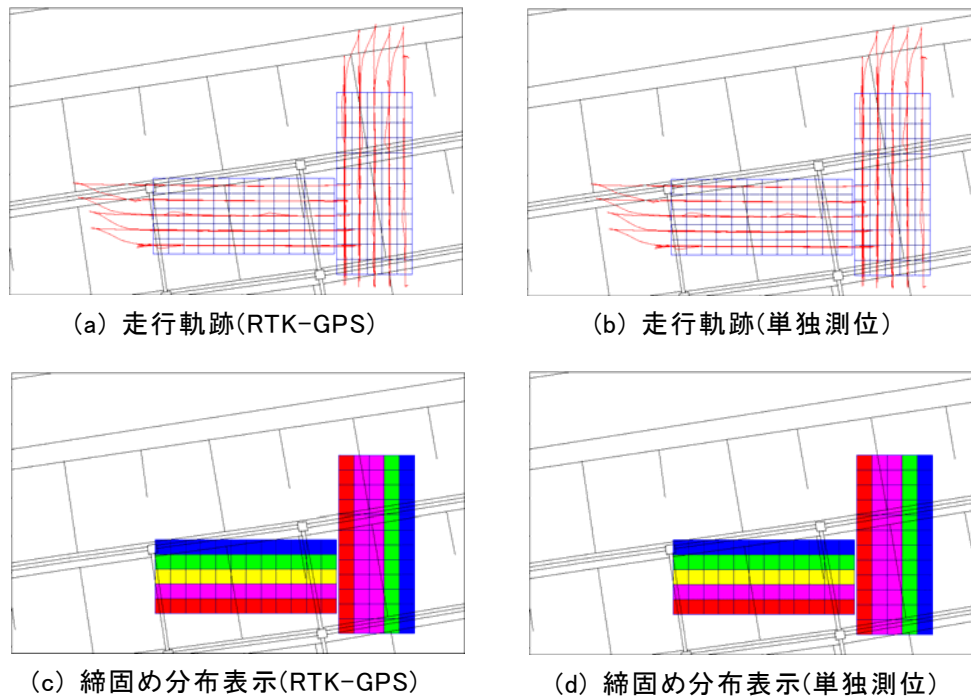


図 5.52 走行軌跡データとそれに基づく締固め回数分布の比較

図 5.52(a)(b)は走行軌跡図、図 5.52(c)(d)は走行軌跡データをもとに描いた締固め回数分布図である。図 5.52(b)から、単独測位データでも 2m の走行レーンの幅内でデータの変動がおさまっており、図 5.52(d)に示したように、2m 四方を 1 メッシュとして描いた締固め回数分布図は図 5.52(c)と同一となった。

この結果から、高さデータを用いない締固め回数分布としては単独測位データの適用の可能性が高いことが分かった。

一方で、施工規定方式による盛土締固め品質管理システムでは基本的には RTK-GPS の高精度データを必要としており、今回検討した単独測位ではその要求を満足することは出来ない。しかしながら、RTK-GPS 測位データの一時的欠落時の対応策として、単独測位法の適用の可能性が見い出せたことは、管理能力に優れた本システムを多くの現場に展開していく上で重要なポイントであると考えられる。

また、本実験では RTK-GPS と単独測位データとを比較するため、観測できる GPS 衛星数は RTK-GPS が必要とする 5 基以上の場合の状況であった。このため、4 基以下の場合を含めた様々な状況での実験を行い、RTK-GPS と単独測位法を組み合わせた新たなシステムを開発したので、次項に示す。

5.6.4 締固め管理システムの高度化－単独測位組合せシステムの構築

前項の実験でその実現可能性が見出されたので、本項では、測位に使用する衛星数を意図的に変化させることにより、さまざまな条件下での単独測位の適用性を把握し、システムへの組み込みの可能性を評価するために実施した、実験について述べる。

(1) 実験概要

a. 機器の配置

機器構成は図 5.50 と同様で、図 5.53(a)に示すように実験車両屋根部に設置した GPS アンテナからの衛星情報を分岐し、1台の受信機で RTK 測位を、もう1台で単独測位を行った。これによって、RTK 測位と単独測位の両方法での位置データを同時取得することができる。



(a)実験車両外観



(b)走行状況

図 5.53 実験概要用車両と実験状況

b. 取得衛星数の変更

- ①測位精度は捕捉衛星の数や配置によって異なる。そこで、さまざまな条件下での単独測位を実現するために、測位に使用する衛星数を意図的に変化させた。
- ②山間部などで捕捉衛星数が減少した場合を想定し、低高度にある捕捉衛星のうちいくつかを、測位に使用しないよう単独測位用 GPS 受信機の設定を変更した。
- ③RTK 測位は捕捉衛星すべてを使用する。

c. 測位データの取得

- ①盛土場において、1 周 400m 程度の周回走行を実施した。締固め重機と同様に車輦を秒速約 1～2m で走行した。図 5.53(b)に走行状況を示す。結果として1周あたり 4 分程度の実験であり、山間部などにおける一時的な捕捉衛星の減少を再現した。
- ②RTK 測位モードが常にフィックスであることを確認した。
- ③測位データはノートパソコンで 1 秒ごとに記録した。

d. 解析

- ①測位データ WGS84(2.2.2 項参照)での座標値を現場工事座標値に変換した。
- ②測位時刻をもとに、RTK 測位データと単独測位データを比較した。

e. 実施結果

実験は事前の衛星観測計画をもとに、二日間にわたり実施した。それぞれの実験条件は表 5.9 のとおりである。捕捉 GPS 衛星数がそれぞれ 4～9 個で一定の衛星数を捕捉した条件下における、単独測位データを取得することができた。

表 5.9 実験条件

実験	実施日	時刻	データ数	GPS 衛星数／PDOP※	
				RTK 測位	単独測位
1	08/06	9:23:36～9:27:07	207	6 / 2.2	6 / 2.2
2	08/06	18:37:52～18:41:37	221	5 / 3.9～4.1	4 / 4.9～5.4
3	08/07	09:39:00～09:43:00	241	8 / 2.1	8 / 2.1
4	08/07	09:43:00～09:46:30	211	8 / 2.1	8 / 2.1
5	08/07	09:47:40～09:51:00	201	9 / 1.9	9 / 1.9
6	08/07	10:09:10～10:13:10	241	9 / 2.0	7 / 2.8
7	08/07	10:27:10～10:31:15	246	9 / 1.9	5 / 4.4～4.6
8	08/07	10:32:30～10:36:15	226	9 / 1.9	4 / 12.8～13.1

※)PDOP…衛星配置状態をあらわすパラメータ、値が小さいほど一様に配置していることを表し、測定条件が良いとされている。

実験1の測位データをプロットした平面図と、標高の時系列変化を図 5.54 に示す。

平面図からは、両者の軌跡は一定の位置関係を保ちながらもほぼ同形状であることが確認できる。これは、単独測位による本システム高度化の可能性を示唆する結果である。特に東西(Y)方向は RTK 測位と大差ないデータが得られたが、これは GPS 衛星の配置が南北よりも東西に密であることによると考えられる。

一方、標高図についても大局的な傾向については同様だが、単独測位の一部に図 5.54 右図の点線部に示すような大きく異なる部分)が見受けられ、不安定な挙動を示している。この点から、標高に関しては本システムに単独測位を導入する肯定的結果は得られない。

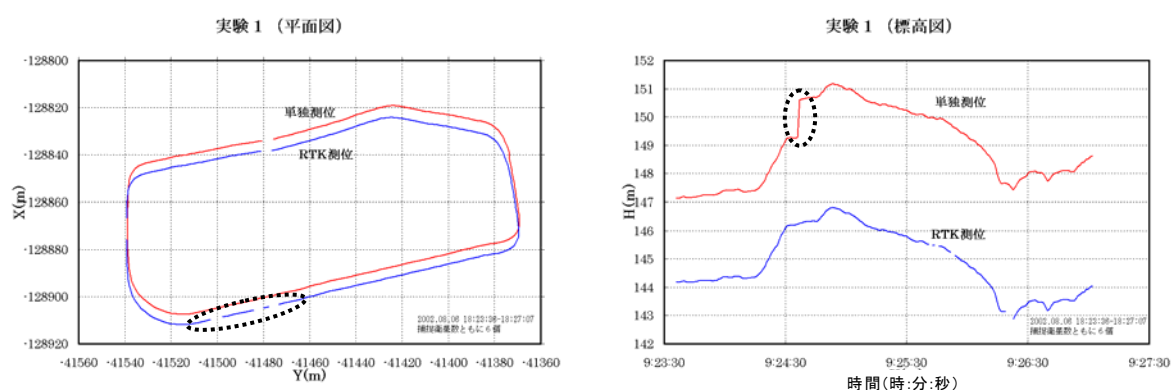


図 5.54 実験 1 での測定結果

RTK 測位データには、電波障害等による測位モードの劣化(図 5.54 左図の点線部:フィックス→フロート)が見受けられた。しかし、単独測位ではこのような現象は生じず、安定してデータが

取得できることは、大きな利点である。

つぎに、同一時刻ごとに RTK 測位との XYH 座標値の差(較差)の算出イメージを図 5.55 に示す。較差の実験時間における推移の一例を図 5.56 に、各実験での較差の平均値および標準偏差をまとめたものを表 5.10 に示す。

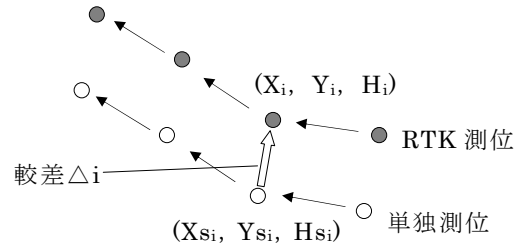


図 5.55 較差の算出

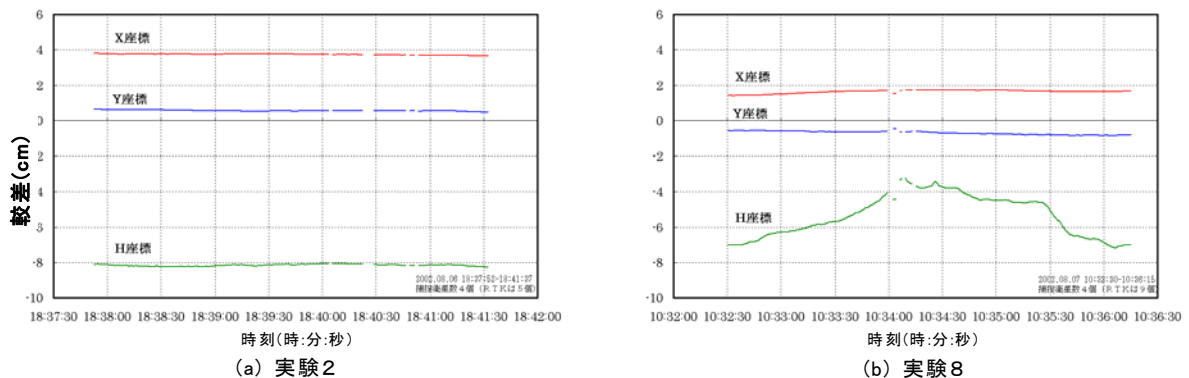


図 5.56 較差の推移例

図 5.56 に示したのは、RTK 測位が不可能となる捕捉衛星数 5 基未満の条件下の実験結果 (表 5.9 の実験 2, 8) である。図 5.56(a) が実験 2、図 5.56(b) が実験 8 の結果である。図から X および Y 座標の較差はどちらも長期的な変動を抱えている可能性はあるが、実験時間内においてほぼ一定であることが確認できる。つまり、一定量だけシフトさせれば、RTK 測位と遜色ない座標を得ることができる。しかし、H 座標の較差は実験 2 では一定だが、実験 8 では大きな変動が見られる。

表 5.9 を見ると、実験 2 では PDOP が 4.9~5.4、実験 8 でも 12.8~13.1 と徐々に増大している。ともに 4 個の衛星を捕捉しているが、実験 8 の PDOP が非常に大きいことから、図 5.56(a)、(b) の標高データの変動の違いは、極端に偏った衛星配置 (例えば複数の衛星が一行に並ぶ等) が引き起こした現象と想像される。PDOP については 2.2.3(2) で記述したが、位置精度劣化率といい、衛星配置状態をあらわすパラメータである。その値が小さいほど一様に配置していることを表し、測定条件が良いとされている。現実的に PDOP の値を監視しながらデータの評価を管理することは可能であるが、PDOP の変動の回避は困難であり、図 5.56(b) のような変動は避けられない。よって、単独測位データの標高については採用するべきでないと考える。

しかし、このようにH座標に大きな変動が生じているにも関わらず、表 5.10 における実験 8 の水平方向の測定結果を見ると、X、Y 方向の較差の平均値(1.629, -0.700m)、及び較差の標準偏差(0.092, 0.099m)とも安定した値となっている。このことから、単独測位は、締固め機械の平面的な走行軌跡が得られる精度を確保しているため、RTK-GPS 測位データの一時的欠落時における締固め回数の管理に十分な適用性があるといえる。

表 5.10 較差の平均値および標準偏差

単位:m	衛星数	平均値			RmsX	標準偏差	
		X	Y	H		RmsY	RmsH
実験 1	6	4.578	0.454	4.029	0.236	0.170	0.668
実験 2	4	3.741	0.556	-8.157	0.036	0.034	0.051
実験 3	8	0.991	-0.187	-0.458	0.018	0.017	0.065
実験 4	8	0.950	-0.087	-0.504	0.020	0.021	0.071
実験 5	9	1.525	-0.129	-1.146	0.039	0.020	0.038
実験 6	7	0.875	0.784	-0.469	0.058	0.068	0.072
実験 7	5	1.675	1.077	-6.573	0.140	0.042	0.138
実験 8	4	1.629	-0.700	-5.370	0.092	0.099	1.162

図 5.57 に今回の実験結果から、XY(水平)方向における較差の標準偏差、衛星数およびPDOP の関係を示す。円の中心位置が衛星数と PDOP を、円の半径が標準偏差の相対的な大小関係を示している。衛星数の減少とともに PDOP が増大していく傾向を確認できるが、PDOP と標準偏差の間に明確な関連性は見当たらない。

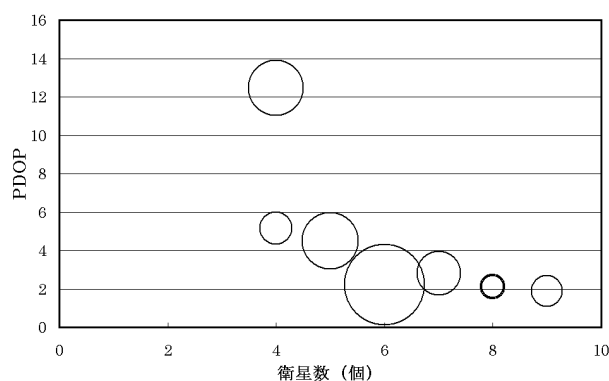


図 5.57 水平方向較差の標準偏差比較

実験 1 では、PDOP が 2.2 と小さく且つ一定であるにも関わらず、標準偏差が最も大きい結果であった。また、水平方向における較差の平均値を比べると、ここでも実験 1 が最大である。実験 2 も同様に較差が大きい、これは衛星数が少ない影響であると考えられる。実験 1 で、PDOP が小さいにも関わらず較差の平均値が大きい理由は不明であるが、このことが標準偏差にも影響を与えている可能性が高い。つまり、較差の平均値がさらに大きい場合については標準偏差も増大することが考えられ、この点には注意が必要である。

実験を通じて、本システムにより締固め回数を管理するうえで、適当なシフト量を加えた単独測位による XY 座標を採用するにあたり、重要な支障がない測位精度を確保していることが確認できた。

g. システム導入方法

本システムへ単独測位を導入する際に、現状の機器構成を変更することなく、締固め管理ソフトの修正のみで対応が可能である手法として下記を提案する。図 5.58 にその流れを示す。

- ① RTK 測位が可能なあいだは、その XY 座標を採用
- ② 測位モードが RTK 測位から単独測位に移行した場合、単独測位データと直前の RTK 測位データとの差を暫定較差 Δ_1 としてシフトした XY 座標を採用
- ③ RTK 測位が不能の間は、②同様に暫定較差 Δ_1 だけ単独測位データをシフトして採用
- ④ RTK 測位が復帰した場合、その XY 座標を即時採用。

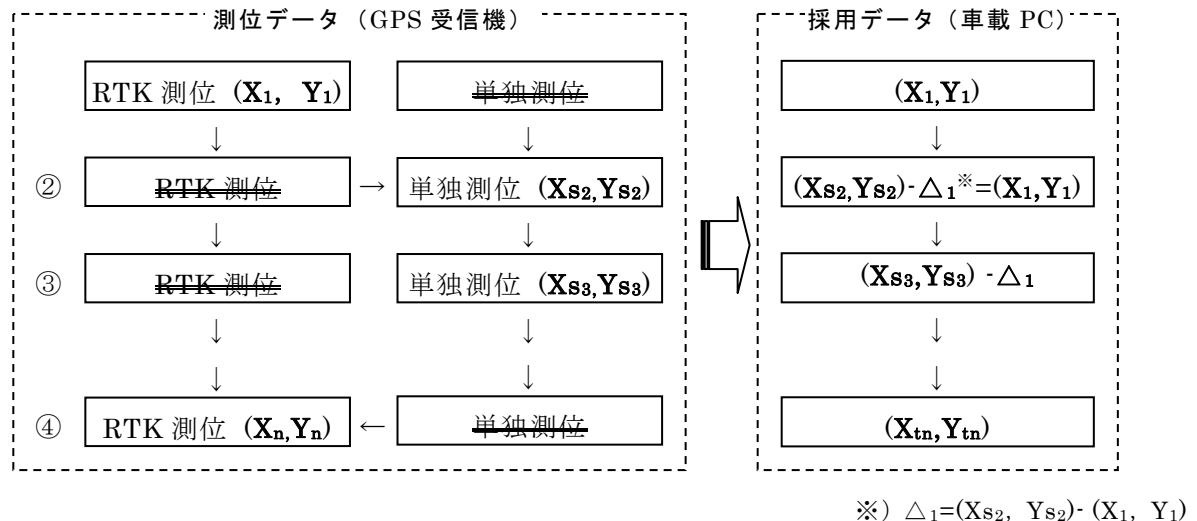


図 5.58 単独測位の導入手法

本手法によれば、本システムの適用範囲の拡大を実現できる。図 5.59 にそのイメージを示す。測位精度にとって重要であるシフト量となる較差を、測位モード移行前後で比較せざるを得ないが、山間部などの場所については重機速度を通常より落とし、較差算出時間の不一致により生じる誤差を低く抑えることでリアルタイムに対処できると考える。後処理に関しては④復帰時の較差を再度計算し、暫定較差を調節することとする。

さらに、長期間(4～5 分以上)にわたる連続的な単独測位の採用や、較差 Δ_1 が大きい(5m 程度以上)場合の精度劣化については、今後の更なる検討が必要である。

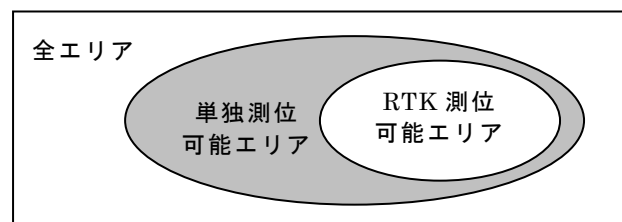


図 5.59 システム適用範囲イメージ

5.7 リアルタイム GPS 測位の高度化検討¹⁰⁾

5.7.1 概要

前項までの検討事項にみられるように、土木施工分野において GPS 測量、特にリアルタイムで数 cm の精度で3次元位置が計測できる RTK-GPS 測量は情報化施工に不可欠な移動体計測には必須の技術となっている。一方、より精密な測量・計測が必要な場合には光学測量が使用されていた。4 章で紹介した、ショベルやブルドーザによる整形作業に関しても、最終的な仕上げ作業には、自動追捕式トータルステーション(TS)が用いられている状況である。しかし、光学測量機器は計測範囲が GPS に比べて著しく狭くなり、操作性も悪くなる。当然、作業によって使用する計測機器を代えることは、非効率であり、経済性も低下する。また、大規模土工事以外にも海工事などは、測量基準点からの距離が大きくなり高精度な計測ができないという課題や、海上での位置計測の場合、光学測量の精度を確保する目的で構築される海上測量櫓が非常に高価でありながら、波浪による動揺を完全に排除することは困難であるなどの問題があった。

このため、情報化施工の更なる効率アップや、海工事等における従来の光波測量技術への問題を解決するため、長距離での高精度化などのリアルタイム GPS の高度化の可能性を実験的に検証した。対象技術としては、FKP 方式ネットワーク型リアルタイム GPS と、複数の固定局の同時利用による RTK-GPS 方式(Multi Baseline RTK-GPS)とした。

なお、目標精度としては、数 km～十数 km の領域において、リアルタイムで水平方向1cm、垂直方向 1～2cm の精度とした。

5.7.2 FKP(Flächen Korrektur Parameter)方式リアルタイム GPS の適用性

(1) 実験概要

一つの固定局観測データを基に誤差補正量を算出する従来型の RTK-GPS においては、固定局と移動局との距離が離れると電離層遅延や対流圏遅延等の影響量の差が両局間で大きくなるため、数 km のエリアで常に高精度を維持することは困難であった。そこで、近年、複数の電子基準点での GPS 観測データを処理することにより、それらの電子基準点で囲まれる領域の誤差補正量を提供して、領域内であれば安定した測位を実現するネットワーク型 RTK-GPS 技術が開発され、運用されている。

ネットワーク型 RTK-GPS には VRS 方式と FKP 方式がある。

2.5.2 項(1)で解説した VRS(Virtual Reference Station)方式は、図 5.60 に示すように観測点周囲の複数の電子基準点の観測データを計算センターに集め、それぞれの電子基準点に関して従来型 RTK-GPS 同様の補正データを算出する。観測点初期化時の単独測位位置を仮想的な基準点(仮想基準点)として設定し、仮想基準点位置での補正データを周囲の電子基準点の補正データから線形補間により求め、移動局へ送信する。移動局では計算センターか

ら受信した補正データを基に、あたかも仮想基準点に実際の基準点があるかのように従来型 RTK-GPS と同様な処理により測量を行う。そのため、従来型 RTK-GPS と同じソフトウェアが利用可能であり、静止測量については観測域内ではほぼ様な精度での測量が期待される。しかし、移動体計測への適用を想定した場合は従来型 RTK-GPS と同様に仮想基準点からの距離により精度が低下するため、精度を維持するためには仮想基準点を定期的に再設定(初期化)するなどの処置が必要となる。

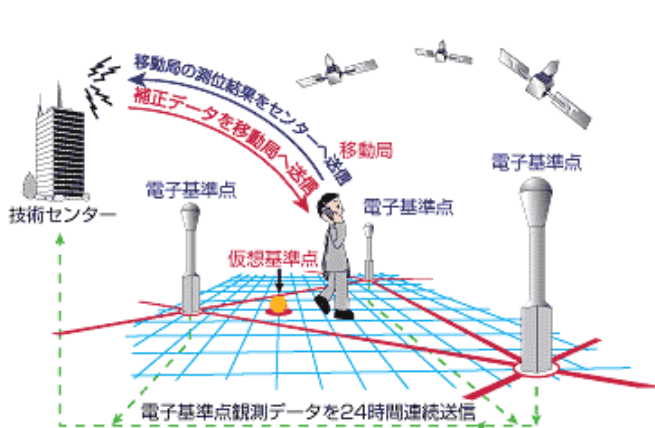


図 5.60 VRS 方式概要



図 5.61 FKP 方式概要

一方、2.5.2 項(2)で解説した FKP (Flächen Korrektur Parameter = Area Correction Parameters) 方式は、図 5.61 に示すように計算センターに集められた複数の電子基準点観測データを基に上空の電離層遅延や対流圏遅延などの誤差要因パラメータに関する状態空間モデルを推定し、各電子基準点を中心とする平面で近似することで、観測点において平面を再現するためのパラメータ(面補正パラメータ)を配信する。観測点では、受信した面補正パラメータ及び単独測位位置を元に自己位置における補正量を算出し、測量に用いる。そのため、原理上は移動体計測においても観測域内では基準点からの距離によらずほぼ様な精度で連続した測量を行うことが可能となる。

以上を勘案し、本実験では FKP 方式を採用し、精度検証及び高精度化の検討を行った。

FKP 方式は日本では三菱電機(株)が 2004 年から全国でサービスを開始している。全国を 13 ブロックに分割し、各ブロック内に点在する電子基準点の観測データを元にブロックごとに誤差要因の状態空間モデルを解析し、面補正パラメータを配信している。例えば、関東ブロックでは、図 5.62 に示す関東一円 23 局の電子基準点が利用されている。仕様上の計測精度(ばらつきの標準偏差)は水平 1cm, 標高 2cm である。しかし、商用的な補正データ配信サービスという性質上、その汎用性の点からは広範囲の補正モデルを構築することは有効だが、ローカルな精度向上の点から考えた場合には必ずしも最適な計測網ではない可能性がある。すなわち、誤差を生む要因としての電離層遅延や対流圏遅延等は地域的条件によって異なるため、計

測対象範囲と同じような影響を受ける近傍の電子基準点に限定した網を構築し補正モデルを解析した方が精度は向上するのではないかと考えた。

そこで、計測対象エリアの周辺にある 5 局の電子基準点を選定し、実験用の基準点網(狭域実験網)を構築することで広域の商用網との比較を行った。なお、比較に際しては FKP に関する詳細な解析仕様が公開されておらず理論的な検討が困難なため、実験により評価を行った。有効性の評価方法としてはフィックス時間及び計測精度(標準偏差)を比較した。

(2) 実験方法

実験は 2007 年 7 月 11 日に東京港中央防波堤外側埋立地で行った。比較した広域商用網と狭域実験網を図 5.62 に、観測点周囲の広域網基準点と狭域網基準点の関係を図 5.63 に示す。FKP は解析網を構成する電子基準点のうちの最寄りの基準点(参照固定局)を中心とした補正面を元に自己位置における補正量を算出する。本実験においては、広域商用網は「練馬」、狭域実験網では「神奈川川崎」が参照固定局となった。



図 5.62 広域網と実験で設定した狭域網

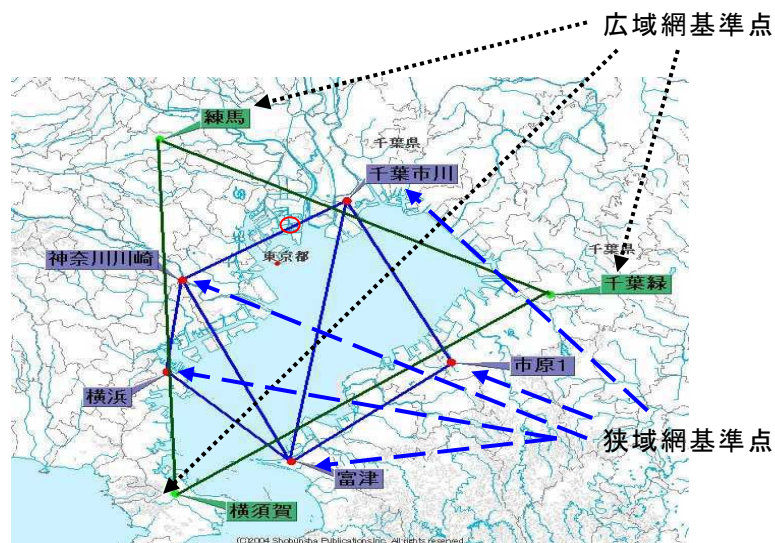


図 5.63 計測エリア付近の広域網基準点と狭域網基準点の関係

実験設備概要を図 5.64 に示す。一組のアンテナ、GPS 受信機からの受信データを分岐させ、広域網および狭域網解析用パソコン(PC)にそれぞれ入力する。PC では専用の解析ソフトウェアを用い、それぞれ受信する面補正パラメータを基に補正量を算出し測位計算を行う。計測は 1 秒エポック×3 分間観測を 1 セットとし、連続した 11 セットを時間帯を変えて 3 回実施することで合計 33 セットを取得した。各計測セットにおいては広域網解析と狭域網解析の初期化のタイミングを同期させ、同一の受信データを基に測位計算を行った。なお、計算センターからの補正パラメータの受信手段は一般には携帯電話を利用するが、本実験場所ではデータ通信が不安定であったため衛星携帯電話を利用した。

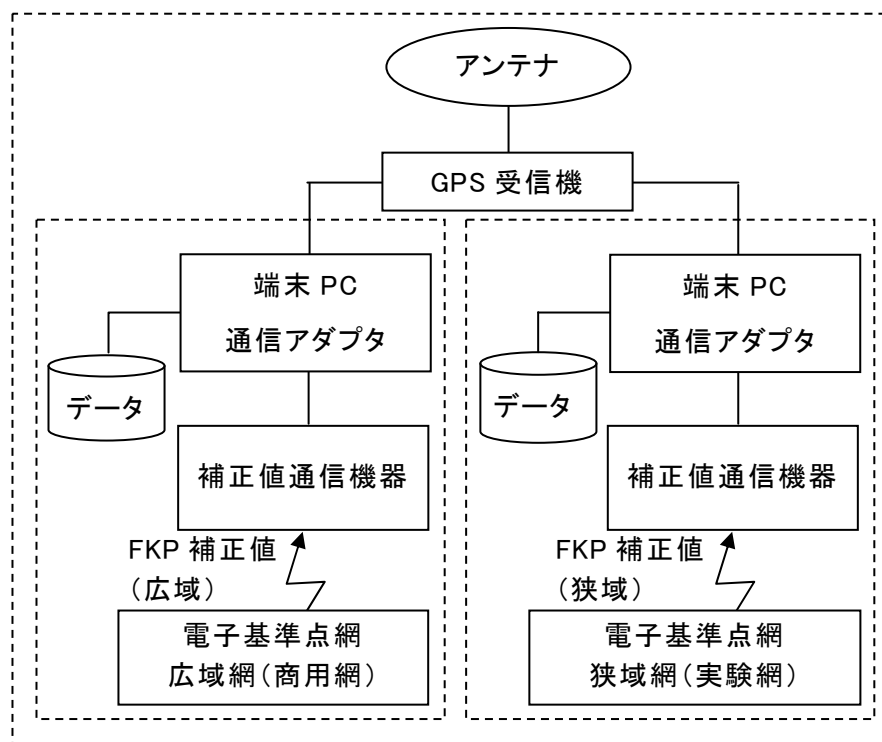


図 5.64 FKP 実験機器構成

(3) 実験結果

a. フィックス時間

全 33 セットのフィックス時間計測結果のうち正常に記録された 27 セットに関する集計結果を表 5.11 に、計測セットごとのフィックス時間を図 5.65 に示す。全体的に時間帯が午後になるにつれてフィックス時間は短くなる傾向が見られたが、概ね全てのケースにおいて狭域網は広域網に比べフィックス時間は短くなり、全体としては約 50%の短縮が確認された。

表 5.11 補正網の違いによる Fix 時間集計結果

	広域商用網	狭域実験網
10:00～11:00 8セット平均	44	21
12:30～13:30 11セット平均	26	15
14:00～15:00 8セット平均	13	9
Avr	28	15

(単位:秒)

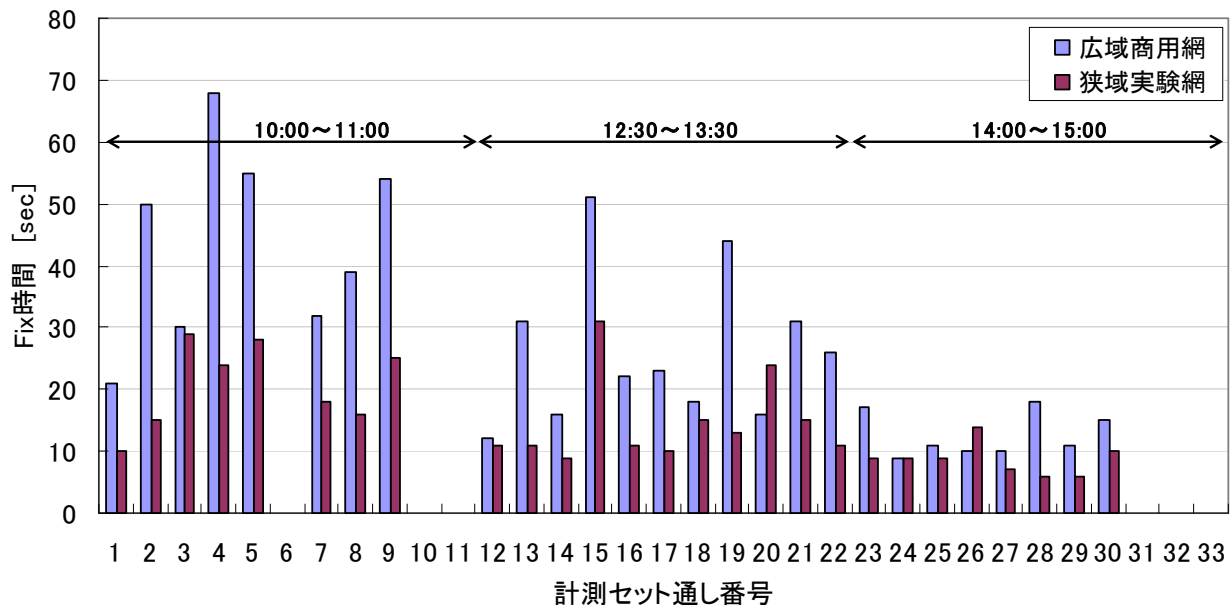


図 5.65 補正網の違いによる計測セット別フィックス時間比較

b. 計測精度

全 33 セットの計測精度の集計結果を表 5.12 に示す。

南北、東西の水平方向の観測データ、及び標高の鉛直方向の標準偏差を表している。

広域網、狭域網ともに目標を達成する精度が得られたが、狭域網は広域網に比べて全計測セットにおいて精度の向上が見られ、全体としては約 20%の向上が確認された。

表 5.12 補正網の違いによる精度集計結果

標準偏差	広域商用網			狭域実験網		
	南北方向	東西方向	標高	南北方向	東西方向	標高
10:00～11:00 3分×11セット	9.0	5.5	26.1	6.1	5.0	23.9
12:30～13:30 3分×11セット	7.6	7.8	19.1	6.1	6.0	13.9
14:00～15:00 3分×11セット	5.7	6.5	20.8	6.1	4.4	13.0
Avr	7.4	6.6	22.0	6.1	5.1	16.9

(単位:mm)

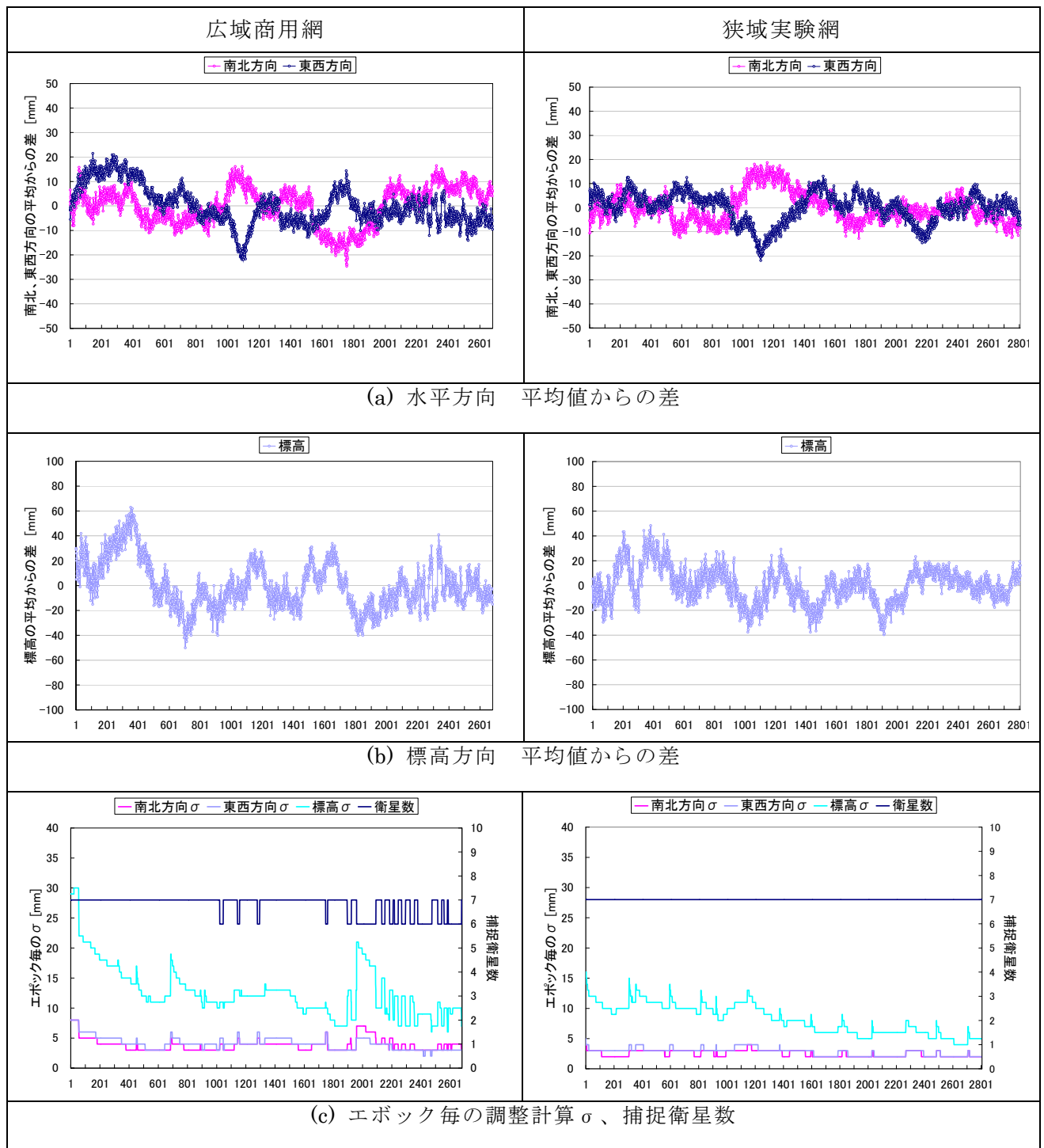


図 5.66 計測結果一例(12:30~13:30)

計測結果の一例として12:30~13:30の観測データを図 5.66 に示す。(a), (b)に示す平均値との差のグラフでは若干ではあるが、狭域網の方が変動幅が小さい。また(c)には、FKP 方式の特徴である、複数の衛星までの擬似距離を用いた同時調整計算の標準偏差を、捕捉衛星数と合わせて示す。FKP 方式では、移動局での測位計算において、面補正パラメータによって補正された各衛星までの疑似距離を基に、最小二乗による同時調整計算により自己位置を算出する。そのため、同時調整計算の標準偏差が小さければ、測位結果はより確かな解ということ

ができる。本実験においては、特に標高の標準偏差において狭域網の方が小さな値を示しており、より安定した計測ができている可能性がある。捕捉衛星数についても狭域網の方が安定しており、この点も標準偏差の小ささに影響していると考えられる。

なお、参考までに平面直角座標系 X, Y, H の平均値を表 5.13 に示す。全体として広域網と狭域網との差は水平、標高共に 5 mm 前後であった。

表 5.13 平面直角座標系測位結果

	広域商用網			狭域実験網		
	X	Y	H	X	Y	H
10:00~11:00 3分×11セット平均	-45,814.0564	-2,451.7821	41.9776	-45,814.0530	-2,451.7805	41.9711
12:30~13:30 3分×11セット平均	-45,814.0476	-2,451.7788	41.9561	-45,814.0438	-2,451.7753	41.9597
14:00~15:00 3分×11セット平均	-45,814.0472	-2,451.7848	41.9549	-45,814.0403	-2,451.7765	41.9743
Avr	-45,814.0504	-2,451.7819	41.9629	-45,814.0457	-2,451.7774	41.9684
広域商用網との差				0.0047	0.0045	0.0055

(単位:m)

(4) まとめと考察

FKP 方式ネットワーク型 RTK-GPS の利用により、標準偏差水平 1cm, 標高 2cm の精度で計測できることを確認した。また、FKP 面補正パラメータ算定のための基準点網を観測域周辺に限定して構築することにより、従来よりもフィックス時間で 50%, 測位精度で 20% 程度の性能向上の可能性があることが分かった。

この他、今回の実験結果から抽出できた特徴や今後の課題を以下に記す。

- ① 本実験においては、結果的に参照固定局までの距離が狭域実験網と広域商用網とで 2 倍程度異なる条件での比較となった。FKP 方式は原理的には参照固定局までの距離に依存しないとされるが、観測網を構成している基準点数と共に、参照固定局までの距離の違いによる特性を把握するための観測データの増強、理論的な面からの検証を行う必要がある。
- ② 狭域網については工事毎に特別な基準点網を構築する必要があるため、基準点設置、データネットワークの構築など別途システム設置費用等が増加することになる。実際には、得られるメリットとの経済性を評価し、導入していくこととなるが、各装置やネットワーク等、ハード及びソフトの低価格化は目覚しく、将来的には十分期待できると考えられる。
- ③ FKP の補正量算出の計算式は公開されておらず、現時点ではメーカに依存しているが、複数データを統計処理しているため、基本的には最小二乗法により最終結果が求められていることは容易に考えられる。FKP の補正データには、計算結果と一緒にそのデータの信頼性が付加されているが、その数値はバラツキと考えてよく、その値によってユーザは、データの使用の良否を判断することが可能となる。基本的には、移動体の位置計測などでは、リアルタイムで計測することが必須であるため、データを選択できる状況は多くはないが、検討すべき課題ではあると考えられる。

5.7.3 複数の RTK 固定局の同時利用による高精度化検討 (Multi Baseline RTK-GPS)

(1) 概要

いわゆる光学測量機を用いる測量では、複数の基準点からの相対測位を行い、その結果に基づいて誤差を分散させ、最終的に成果を得ることが常識的に行われている。しかしながら、2.4 項で述べた従来型 RTK-GPS は、図 5.67 に示すように、ある 1 点の基準点からの相対測位である。このことから、複数の固定局からの相対測位を行うことによって、計測精度を向上させることができるのではないかと考え、実験によってその可能性を検証した。理論上は、一般測量と同様に、正三角形の中心に計測点が位置するような配置にすれば最も誤差を減少させることができると考えられる。

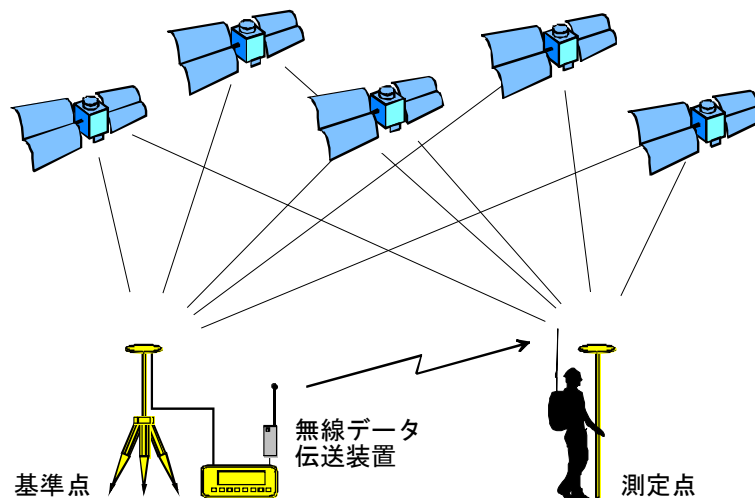


図 5.67 RTK-GPS の配置

(2) 実験方法

実験は 2007 年 3 月 23 日に東京港中央防波堤外側埋立地で行った。Multi Baseline RTK-GPS (3 固定局仕様) のシステム概要を図 5.68 に、3 つの固定局と観測点との位置関係を図 5.69 に示す。観測点に設置した一つの GPS アンテナからの信号を 3 つに分岐させ、各受信機に入力する。各受信機では対応する固定局からの補正情報を元に測位計算を行う。各受信機の測位結果は統合解析用 PC に集められ、同一時刻 (GPS 時刻) の測位結果に対し各固定局までの距離の逆数を重量とした加重平均により観測点座標を算出した。計測は 1 秒エポック×3 分間を 1 セットとし、13 時から 16 時の間に計 16 セットのデータを取得した。

なお、加重平均値 \bar{v} は、各点のデータを a, b, c とし、固定点までの距離をそれぞれ la, lb, lc とすると式 (5.5) のようになる。

$$\bar{v} = \frac{(a \times 1/la) + (b \times 1/lb) + (c \times 1/lc)}{(1/la + 1/lb + 1/lc)} \quad (5.5)$$

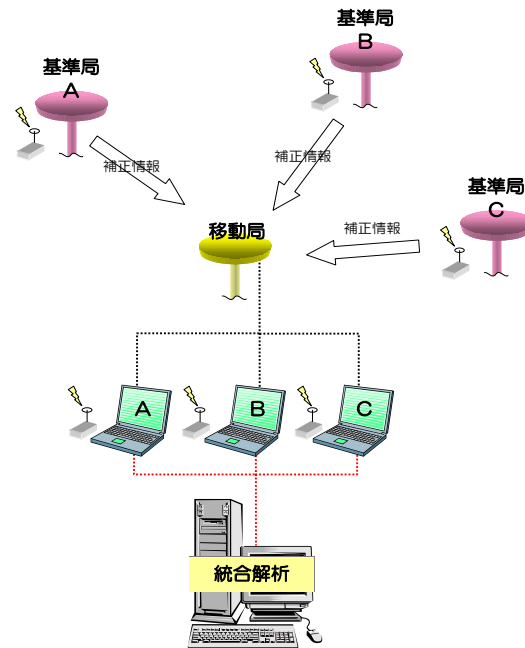


図 5.68 Multi Baseline RTK-GPS (mRTK)の配置

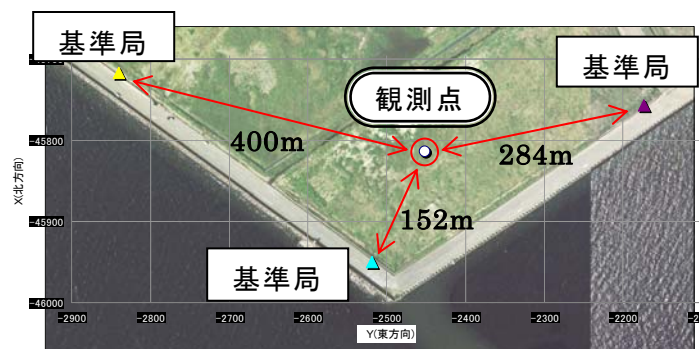


図 5.69 実験時の基準局、観測点配置

(3) 実験結果

水平直角座標系に換算したX,Y,H座標値の集計結果を表5.14に示す。また、実験結果例として各受信機の単独RTK測位結果とそれらを加重平均したものを時系列に図5.70に示す。図の中央の水色太線で示したデータが加重平均値である。3つの固定局との距離が近かったこともあったが、各固定局との組み合わせにおける測位の標準偏差は数mm程度と精度の良いものであった。X,Y,Hそれぞれ平均25%程度、最大で40%の改善が見られた。

表 5.14 加重平均による改善結果

組み合わせ 基準局	X			Y			H		
	Avr (m)	Std (mm)	Max-Min (mm)	Avr (m)	Std (mm)	Max-Min (mm)	Avr (m)	Std (mm)	Max-Min (mm)
基準局 A	-45811.9755	1.8	9.8	-2448.9266	1.3	6.0	4.5340	4.0	18.6
基準局 B	-45811.9740	2.2	10.4	-2448.9269	1.7	7.4	4.5123	6.3	36.8
基準局 C	-45811.9741	1.7	9.4	-2448.9274	1.7	9.1	4.5442	5.0	25.6
加重平均	-45811.9743	1.5	6.9	-2448.9271	1.1	6.5	4.5331	3.8	20.8

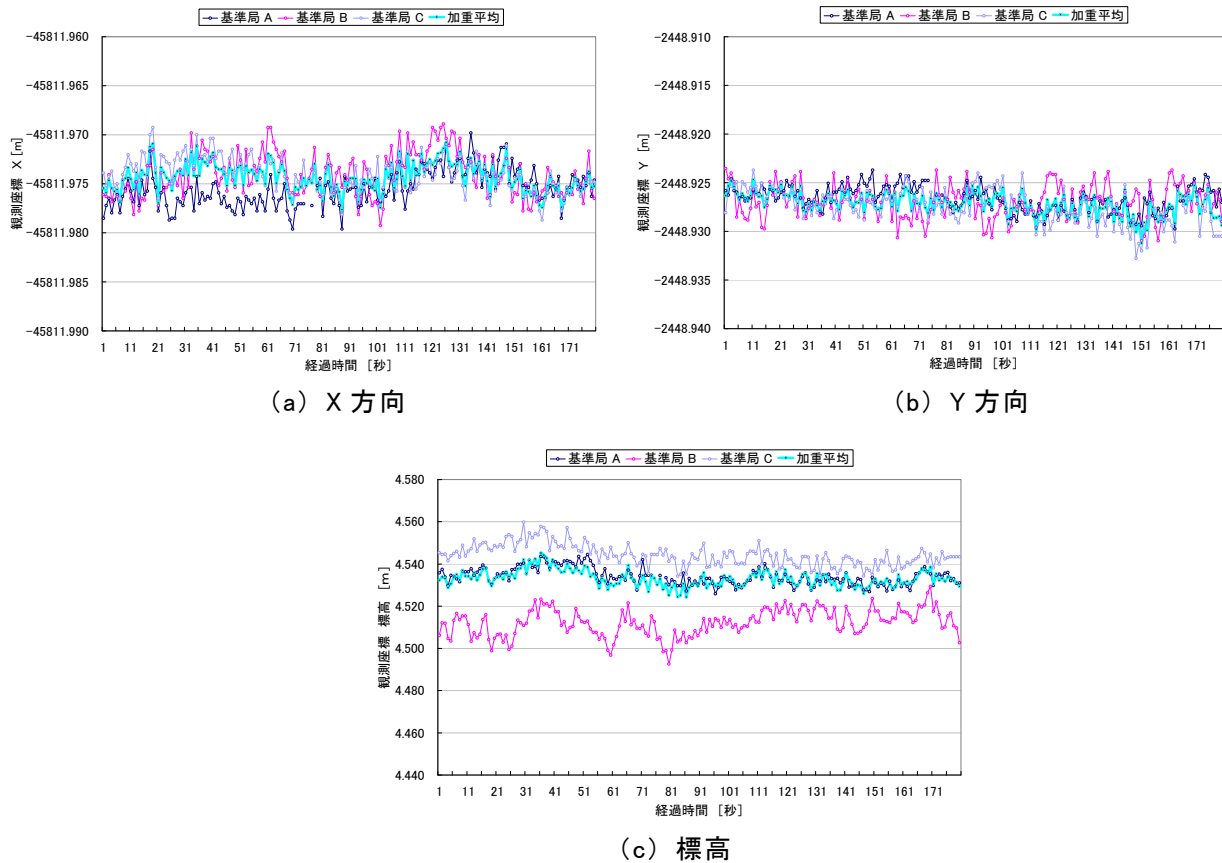


図 5.70 Multi Baseline RTK-GPS 計測結果一例

(4) まとめと考察

従来型 RTK-GPS において複数の固定局からの補正情報を同時に利用することにより、目論見どおりの測位精度の向上を確認することができた。今回は基線長が最大で 400m程度での実験であったため、より長基線での実験、観測による効果の確認が必要であるが、RTK-GPS を応用した精度の良い計測を行う方策として本方式が有望であることは証明されたといえる。

これまでは、RTK-GPS を導入している現場においても、一部の高精度な計測の要求に対しては、経済性や作業効率を犠牲にしても光学測量機器が用いられてきた。しかし、光学測量機器の適用が困難な対象に対しては確立されたものはなく、計測機器の組み合わせで対応している状況である。本技術の汎用化、実用化については以下の項目についての検討を重ねる必要があるが、RTK-GPS 測量の高精度化の一つの道筋を示した効果は大きいと考える。

- ① 基準点の配置状況の違いによる精度への影響把握
- ② 複数受信機からの効率的なデータ取得方法の開発
- ③ 基準点や移動局での GPS 機材増設等による経済性評価

5.8 海外工事における GPS の活用

海外の、特に発展の途上にある国における建設工事に GPS を導入する場合には、相対測位の基準とすべき国家基準点の信頼性が低く、地域ごとの整合性も取られていないために、施工者自身が工事用インフラ構築を一から求められることが少なくない。

本項では、海外における IT 導入の一例として、アルジェリア東西高速工事における実施について記す。検討事項としては、以下の2つである。

- ① 広域における低信頼公的基準点の取扱いと現場運用方法の検討
- ② 長距離 RTK-GPS 測量の実情と活用方法の検討

5.8.1 工事概要

アルジェリアは一時的に国内混乱の時期があったものの、90年代半ば以降、テロ対策の強化を含めた治安情勢の安定化や一連の民主化プロセスを含む内政問題の解決に尽力するとともに諸外国との外交を積極的に推進してきたことにより、マグレブ諸国の一員として急速に国際的プレゼンスを高めてきている。最近では、石油、天然ガス等のエネルギー価格の上昇により、経済、財政も急速に回復し、エネルギー資源開発はもとより運輸、交通などの社会インフラの整備を積極的に進めている。今回建設する高速道路は、他工区も含めるとチュニジア国境からモロッコ国境までを結ぶもので、アルジェリアの基幹的な交通網・物流網と位置付けられ、開通後は同国の経済発展に大きく寄与することになる国家プロジェクトである。

本工事は、アルジェリア国内を東西に横断する約1,200kmの高速道路を3工区(東工区、中工区、西工区)に分けて建設するもので、そのうち東工区の約400kmを鹿島建設を代表者とする共同企業体が担当している。図5.71に現場位置、表5.15に工事の概要を示す。



図 5.71 工事現場位置図

表 5.15 東工区全体工事概要

工事名		アルジェリア東西高速道路建設工事(東工区)
発注者		アルジェリア公共事業省高速道路公団
工事内容	区間	チュニジア国境～ボルジブ・アレリジ(約 400 km)
	道路	片側 3 車線上下 6 車線高速道路, インターチェンジ 22 ヶ所
	構造物	トンネル 6 本(延長 9.4km), 本線橋梁 43 ヶ所, 横断道路橋 88 ヶ所, 横断道路トンネル 109 ヶ所
	土工事量	約 1 億 1, 000 万 m ³
	コンクリート工事量	約 193 万 m ³
工期		2006 年 10 月～2010 年 2 月(40 ヶ月)

表 5.15 から分かりますとおり, 本工事における工事量の規模は国内工事とは桁違いである。100 km にわたり, 全体的に平坦で, 周囲に遮るものもなく遠くまで見渡せることから「地平線工区」と呼ばれている工区などもある一方で, 起伏の大きい山岳地帯でのトンネルや橋梁工事も多く, 延長 400km に及ぶ高速道路を 40 ヶ月という極めて短い工期に対応するためには, 土工事における IT 施工の導入が不可欠であると考えた。

5.8.2 広域における低信頼公的基準点の取扱いと現場運用方法の検討

(1) 工事基準点と問題

本工事における測量基準点として, 下記の基準点が示されていた。

① NGA 点

アルジェリア国水準点であり, 既存の構造物等はこれを基準にして建設されている。NGA 点は, チュニジア・チュニス港の海拔=0m を基準に, 約 50 年前にフランスの IGN(日本の国土地理院あたる機関)が設置したものである。しかし, その後, アルジェリア国家によるメンテナンスは, 一切実施されていない。

② FUGRO 点

FUGRO は, 地質工学分野, 測量分野, 地球科学分野を統合した, オランダに本社がある調査・コンサルティングサービス会社の名である。FUGRO によって, 本工事用の地形図を作成するための基準点として, スペインとイタリアにある国家基準点を与点として GPS 静止測量(24 時間観測)を実施した後, 網平均処理から設定した基準点が FUGRO 点である。

当初から, NGA 点の信頼性は問題であったので, 工事基準点としては FUGRO 点を利用することを基本に考えたが, 下記のような問題が発生した。

2.4.2 項で述べたように GPS によって測定される計測点の3次元座標は WGS84 楕円体を準

拋橢円体とした緯度，経度，橢円体高である。このうち，緯度，経度については，国際標準である WGS84 橢円体とそれぞれの国の国家座標との換算式が示されているため，容易に換算することが出来る。しかし，標高に関しては『ジオイド(geoid)』の問題があり，単純に換算することは出来ない。

すなわち，標高とはジオイド面を基準とする高さである。ジオイドとは地球重力の等ポテンシャル面のうち平均海面に一致するものである。ジオイド面は WGS84 橢円体面とは一致しないばかりか，地中の物質性状等によって変化するため定式化できるものではないため，通常は直接水準測量(レベル測量)によって求めなければならない。

WGS84 橢円体からジオイドまでの高さをジオイド高という。GPS で観測した高さ(橢円体高)は従来の水準測量(標高)とは一致せず，ジオイド高を補正する必要がある。橢円体高と標高，ジオイド高の関係(図 5.72 に図 2.22 を再掲した)は式(5.6)で表される。

言うまでもないが，もし，ジオイドを考えずに橢円体高の数値だけで施工したとすると，排水勾配をつけたつもりが，水が逆に流れるというようなことが発生することもある。ちなみに，日本国内においては，任意の位置のジオイド高は国土地理院によって詳細に整備されたジオイドモデルによって精度良く推定できる。

$$h = H + N \quad (5.6)$$

h : 橢円体高

H : 標高

N : ジオイド高

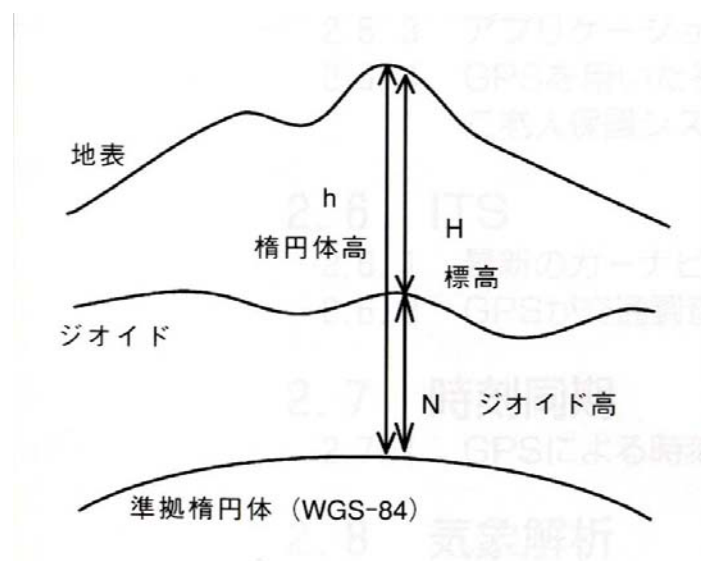


図 5.72 標高，橢円体高，ジオイド高の関係

前述のように，緯度，経度に関しては，スペインとイタリアにある国家基準点を基準とした FUGRO 点を利用する方が，基線長が大きいとはいえ，50 年間全く改訂されていない NGA 点を使用するよりも信頼性は高いが，標高に関しては前述したジオイドを考慮する必要があるため，遠方の基準点から算定することは不可能であった。

一方，信頼性の問題は残るが，アルジェリア国内の既設構造物は NGA 点を基準として建設されているので，既設道路とのすり合わせも必要である本工事における標高データは，NGA 点

を基準とすることが合理的であると考えた。

(2) NGA 点を水準の真値として扱った場合の問題点

しかし、NGA 点を使用するにあたり、根本的な問題が発生した。すなわち、例えば日本における全ての標高データが東京湾の平均海面標高を基準とした値に管理されているのとは異なり、長年更新されていないために、NGA の標高データにおいて地域間の整合が図られていないため、工事工区毎に基準となる水準点に差が生じている可能性が高い。

図 5.71 や表 5.15 で示したように本工事は、東西に長くまた、沿岸地帯から山岳地域まで標高の差も大きい工事区間である。一方、NGA 点は沿岸付近のチュニス港の海拔 0m 点から山岳地域まで 50 年前に測量でつないだ、信頼性に問題のある各工区毎の基準点に基づき標高を計測したため、図 5.73 に示すように、7つの区間で 100m であるとする標高は、隣接する区間でずれが生じていた。

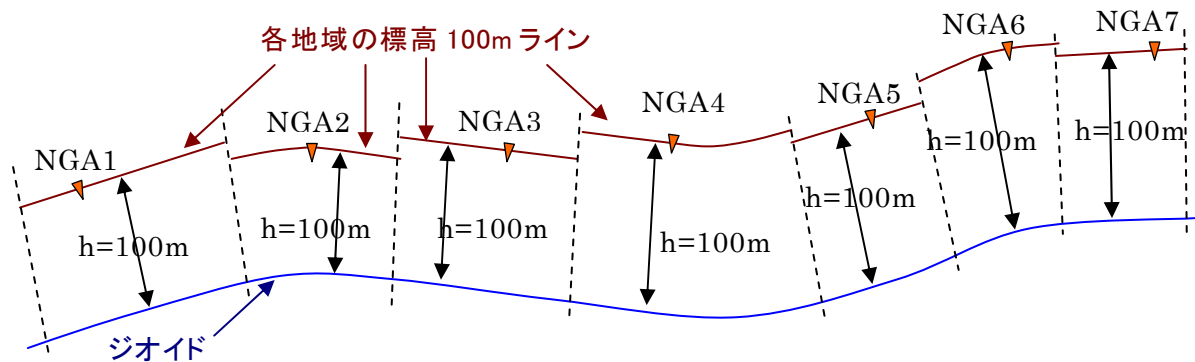


図 5.73 標高データの誤差問題のイメージ

(3) ジオイドマップの活用

上述のような標高データの補正方法として、標高の基準をジオイドマップに求め、図 5.73 における7区間のそれぞれの標高の差を補正することとした。ジオイドマップは唯一のものであり、汎世界的なジオイドモデルである EGM96 (図 5.75) の利用が可能である。図 5.74 のように全区間の中の一点を共通基準水準点として、この点における標高 100m が、他の全区間から見ても標高 100m となるように、各工区の NGA 点の標高を補正しておく。この操作によって、補正した NGA 点を基準として各工区毎に測量を行えば全線にわたって整合の取れた共通の測量が行えることになる。

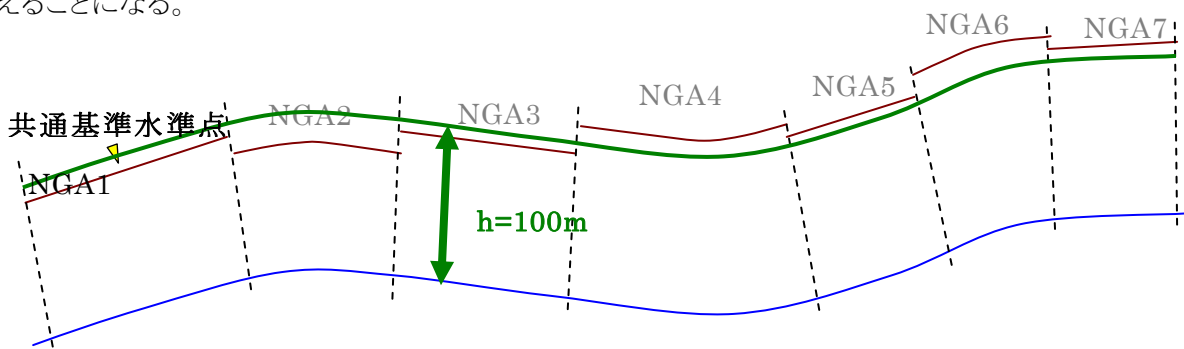
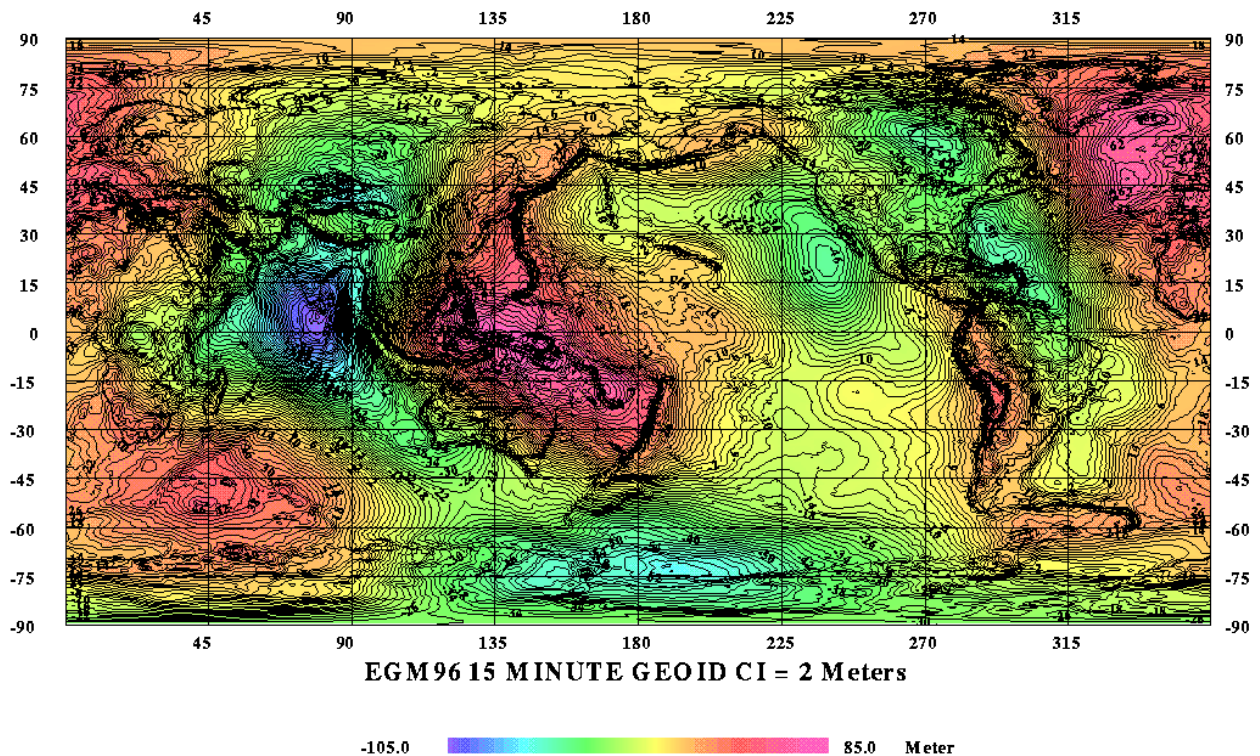


図 5.74 標高データの整合の考え

図 5.75 EGM96(世界ジオイドマップ)¹¹⁾

(4) まとめ

標高決定のための手順を下記に示す。各現場での作業は④⑤となる。

- ① 図 5.72 における基準水準点の緯度、経度、楕円体高を FUGRO 点を基準とした GPS 測量によって求める。
- ② 基準水準点の緯度、経度における EGM96 データを、GPS 測量によって求められた楕円体高から減算する(H_0)。
- ③ 基準水準点におけるアルジェリア国家基準座標(NGA)による標高と H_0 との差を求める(h_0)。
- ④ 各工区の基準点の緯度、経度を FUGRO 点を基準とした GPS 測量で求める。
- ⑤ 緯度、経度データにおける EGM96 データを楕円体高から減算すると共に、 h_0 を加える。

5.8.3 長距離 RTK-GPS 測量を余儀なくされる場合の留意点に関する検討

本工事における GPS の活用として、現地の測量技術のレベルの低さによる精度の低下を防ぐ目的で、4.2.2-(2)節で述べた『RTK-GPS による測量位置誘導システム』の導入を検討した。

本来、本工事の施工エリアの大きさから考えると多くの測量基準点を設置する必要があるが生じるが、持ち込み数量に限りがある GPS 受信機を同時に多く使用しなければならない静止測量を何度も行うことは非効率的であり、一人で簡単に測量が行える RTK-GPS による現場基準点の設置が効果的である。しかし、正確な現場基準点が少ないため、一つの基準点から出来るだけ多くの相対測位を行う必要が生じた。

通常, RTK-GPS の適用範囲は, 基準点から数km以内とされており, 日本国内の実績を調べたところ, この範囲外で実施した報告は見当たらなかった。このため, 基準点から計測点から計測点までの距離が 10km を超える場合に生じる誤差(バラツキ)の評価を行うために, 現地で実験を実施した。

図 5.76 と図 5.77 に実験結果の一部を示す。

これは, 基準点から約 10km 離れた地点での RTK-GPS での観測結果(高さデータ)である。

図 5.76 はある日の午前の観測結果で, 図 5.77 は午後の観測結果で, それぞれ 6 時間で計測した 21,600 データの度数分布を表している。

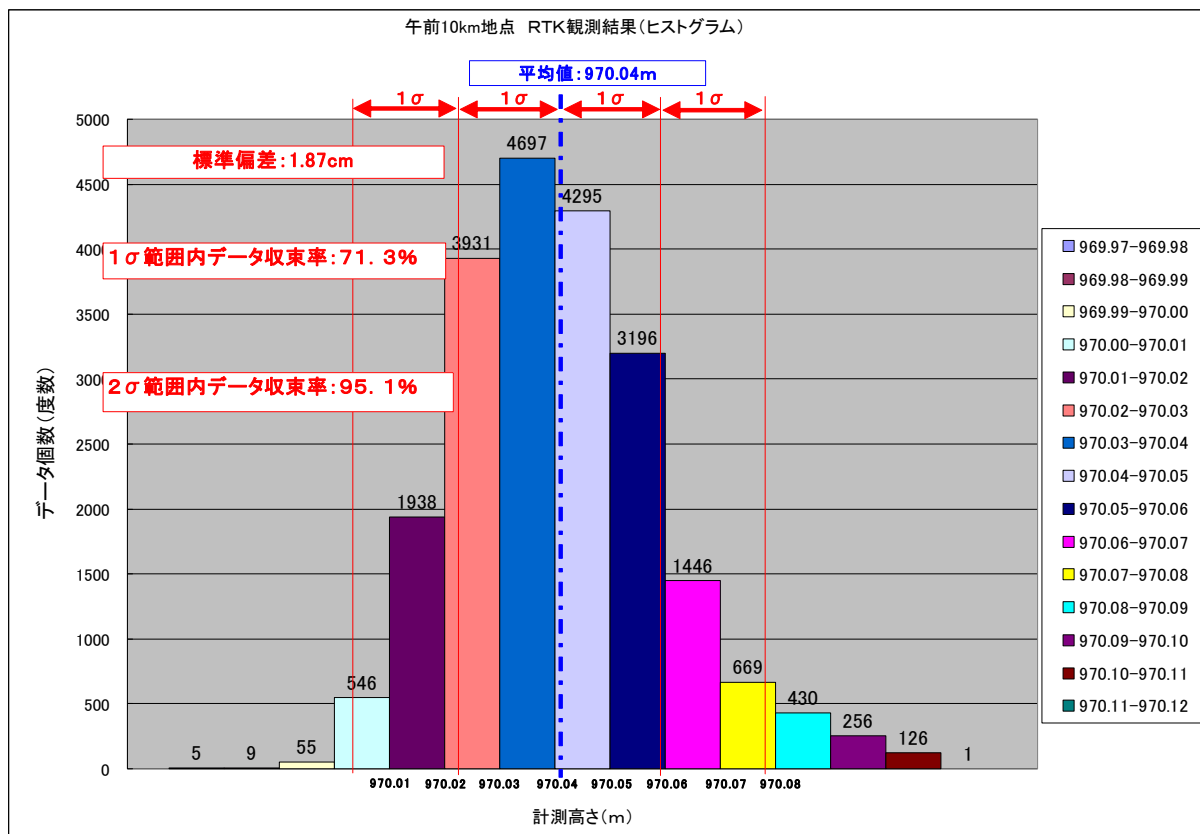


図 5.76 RTK-GPS 観測結果例(1)

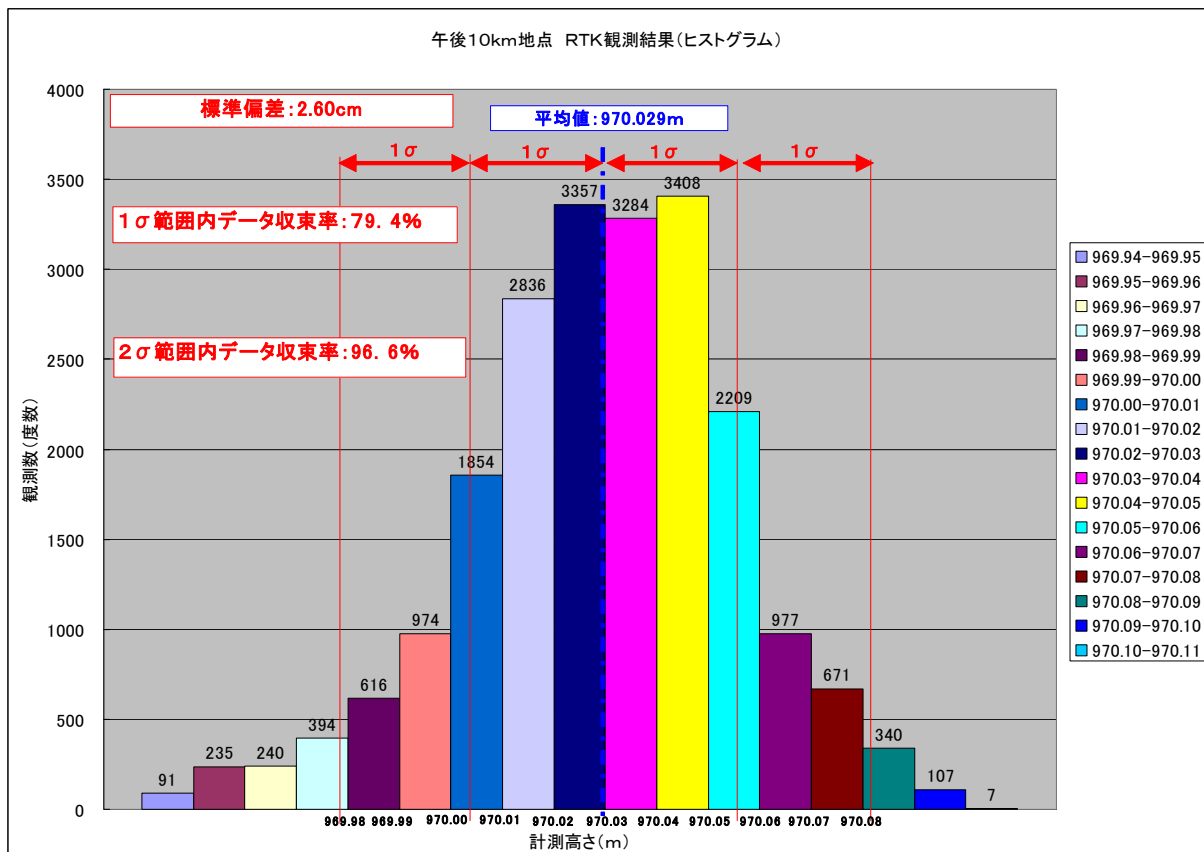


図 5.77 RTK-GPS 観測結果例(2)

この結果から、以下のことが分かる。

- ・ 長時間計測の平均値は 1～2 cm 程度の差で測定できることが推定される
- ・ 時間帯によってバラツキは変動し、標準偏差(1σ)で 2～3 cm 程度である

→ 基準点からの距離 10km で RTK-GPS を使用する場合の運用条件として、バラツキを抑えるために以下のように設定した。

- ① 現場の測量基準点として扱う場合は、30 分(1800 データ)以上の観測値を平均する
- ② リアルタイム性を生かす場合でも、10～20mm 精度が必要な場合には 10 データ(10 秒)以上のデータを平均する

上記運用条件の根拠を以下に示す。

平均 μ 、標準偏差 σ の母集団から抽出した n 個のデータの平均値 $\overline{X_n}$ の分布は、平均 μ で、標準偏差 $\sigma(\overline{X_n})$ は、式(5.7)で表わされる。

$$\sigma(\overline{X_n}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.7)$$

これから、①の条件ではバラツキは $1/\sqrt{1800} \div 1/40$ 、②では $1/\sqrt{10} \div 1/3$ 程度に抑えられる。なお、現在 2009 年 3 月現在も本工事施工中であり、特に土工区間では、GPS を搭載した建設機械による情報化施工システムが大規模に稼働中である。

[参考文献]

- 1) 横田ほか:「施工規定方式における品質管理基準値の設定とその評価」,「土と基礎」, Vol.50, No.9, pp.7～9, 2002.
- 2) 藤井ほか:「GPSを利用した締固め管理システムの検討—大規模工事における情報化施工に関する検討」, 地盤工学会第 37 回研究報告会, 2002.
- 3) R. R. Proctor : Fundamental Principle of Soil Compaction; First of Four Articles on the Design and Construction of Rolled-Earth Dams, Engineerin News-Record, Vol.111, No.9, pp.245～248, 1933.
- 4) 土質工学会(現・地盤工学会):粗粒材料の現場締固め, pp.90～96, 1990.
- 5) 畠昭治郎・建山和由・石澤利明:振動ローラを用いた現場締固めにおける密度予測に関する研究, 土木学会論文集, 第 364 号／Ⅲ-4, pp.229～237, 1985.
- 6) 建山和由:土の締固め施工の合理化に関する研究, 京都大学学位論文, 第 6 章, pp.77～112, 1988.
- 7) 吉田輝・北本幸義・早崎勉:施工規定方式における規定転圧回数の実用的な更新方法, 土木学会第 59 回年次学術講演会(Ⅲ), pp.55～56, 2004.
- 8) 地盤工学会:地盤調査の方法と解説, p.577, 2004.
- 9) 横田ほか:「GPS締固め管理システムの山間部における適用性向上に関する一考察」, 地盤工学会第 36 回研究報告会, 2001.
- 10) 村田曄昭・黒沼出・三浦悟:リアルタイム GPS 測位の高精度化に関する実験的検証, 平成21年度応用測量論文集, pp.129～136, 2009.
- 11) National Geospatial-intelligent Agency (NGA) “WGS 84 Earth Gravitational Model”
 <URL:<http://earth-info.nga.mil/GandG/images/ww15mgh2.gif>>(最終アクセス 2009.5.8)

6. 本論文の結論と今後の展望

本章では、前章までに述べてきた研究成果をまとめると共に、情報化施工技術の今後を展望する。

6.1 研究成果のまとめ

GPS はその利便性からこれまで土木分野の多くの場面で使用されてきた。一方で、計測技術的には既に欧米によって完成されたシステムであったため、性能向上に関する検討はほとんど手をつけることができず、いわばカタログ上の性能の範囲で使用される状況にあった。しかし、GPSの精度を若干でも向上させることによって、適用範囲が飛躍的に広がる分野も多く、このため、使用者側の工夫によってGPSの精度向上が図れるのではないかと考え、性能向上にかかわる検討を行ってきた。

性能向上に関わる研究結果として、情報化施工技術として検討を進めてきた盛土締固め管理システムの実用化を目的として開発・検討してきた5つの成果を以下に要約する。また、さらに高い計測精度が求められる対象にも適用を広げるためのGPSの性能向上や、基準点等の測量インフラが整っていない海外においても当技術を適用することを目的として検討した成果についても以下にまとめる。

(1) 盛土締固め管理システムの開発背景と管理基準値の明確化

従来の盛土の品質(締固め)管理は、施工面積によってあらかじめ定められた点数の土の密度や空気間隙率等を測定する『品質規定方式』、あるいは盛土面積から算出される締固め機械の必要稼働時間を管理する『工法規定方式』が採用されてきた。しかしそれぞれ、多大な労力・時間を費やす作業であることや、盛土全面を均一に施工したことを確認することが困難である、などの問題が指摘されていた。また、これらの計測は盛立て工事と併行して実施されるため、ある範囲内で建設機械と人が同時に作業を行うことになり、安全管理上、改善すべき事項となっていた。

これらの問題は広大な範囲を大型施工機械で施工する高盛土・大規模盛土工事で顕著であった。このためリアルタイムで正確に位置計測が行えるGPSを利用して、締固め機械の走行軌跡から転圧回数分布を求め、施工ヤード全体にわたって十分な施工が履行されているかどうかを自動的に確認・管理する『施工規定方式』を開発し、施工の高品質化を目指して大規模土工事を中心に現場適用を図ってきた。

施工規定方式では、締固め機械の走行軌跡から施工エリア内に設定したブロック毎の締固め回数をカウントして、所定の回数に達していることで施工品質を管理する。このため、基本的には施工エリア内の全ブロックが所定回数に達するまで締固め作業を実施することになるが、実際の現場では地形の凹凸等による走行時の微小な蛇行(10cm程度)が締固め回数のばらつきとしてカウントされてしまう現象が発生した。このような走行軌跡のずれを全く許容しないと、必

要以上に施工時間が掛かり、生産性が向上しないため、施工品質を低下させずに合理的に判断が行える施工管理基準値の設定を検討した。

管理基準項目としては、施工されたヤード全体にわたる施工管理という観点から、全管理ブロックの平均転圧回数(Nave.)を採り上げ、また、規定転圧回数(Nreq.)を下回る管理ブロックの出現はある程度許容するという観点から、規定転圧回数以上の管理ブロック数(N_s)が全管理ブロック数(ΣN)に占める割合($N_s / \Sigma N$)を採り上げた。

具体的な基準値に関しては、実工事における同一施工エリア内において、従来の管理と施工規定方式による管理を併行して進め、施工後の土構造物の品質を比較することにより決定する方法を採用した。

施工規定方式による管理エリアでは、締固め機械の走行などによって発生する締固め回数のばらつきを考慮し、締固め回数の平均値、及び所定の締固め回数の到達率をパラメータにして管理するエリアと、従来の品質規定方式(RI 計器による土の密度・含水量測定)による施工エリアに分け、1ヶ月間にわたり、各エリアの施工品質を比較した。

これらのデータをもとに、事前に定められた所定の締固め密度を満足するときの Nave.及び $N_s / \Sigma N$ を求めると、それぞれ $Nave. \geq Nreq.$, $N_s / \Sigma N = 89.9 \sim 99.0\%$ なる値が得られた。そこで、施工規定方式における品質管理基準値を、全管理ブロックの平均転圧回数が規定転圧回数以上であること($Nave. \geq Nreq.$)、かつ規定転圧回数以上の管理ブロック数が全管理ブロック数の90%以上であること($N_s / \Sigma N \geq 90\%$)と設定することが妥当であることを確認した。

(2) 盛土層厚管理のためのデータ処理法の提案

盛土締固め管理システムでは、決められた締固め機械により施工ヤード内のすべてのメッシュが規定の回数締固められ、すべてのメッシュが規定の締固め層厚であれば、モデル施工により決定した施工が履行されていると言える。すなわち、前項の『締固め回数の管理基準値』とともに、すべてのメッシュが規定の厚さで施工され、それがデータ化されていることが必要となる。厚さの計測も走行軌跡同様に、GPS によってリアルタイムに得られる締固め機械の3次元位置情報から算出することが考えられた。

当初の施工要領では、施工エリア全域での全メッシュ毎に、その下層部の盛土高さとの差から求められるデータを層厚として、施工エリア全域における最大の層厚を施工基準値とする管理方法が採用された。

しかし、盛土材料の大きさや性状のバラツキ、及びGPSの鉛直方向の計測精度が4~5cmという状況のため、すべてのメッシュを規定厚さに締固めること及びそれを正確に評価することは困難であった。このため、それらの状況を考慮した現実的な管理基準や管理方法が必要となっていた。そこで、全てのメッシュ毎の高さ管理から、より現実的で実用性のある、定点での高さ管理方法を提案した。しかし、その定点上にGPSで測定される標高データが常に存在すること

はないので、定点周辺のデータ群から算出することが必要となった。そこで、定点データとして採用するデータの候補を次のように考えた。

- ①測点の最近傍値
- ②測点の任意半径内の初期値・最終値・最高値・最低値・平均値
- ③測点を含む管理ブロック内の最終値

これらの適用性を確認するために、実際の現場内に 150m×40m の試験エリアを設けて実験し、定点データの選定法を決定すると共に、実現場でその適用性を確認した。

その結果、一ヶ月以上の長期にわたるデータの蓄積に基づき、実用性が高いと考えられる高さ管理方法及びデータの処理法を考案し、実工事でその有効性を確認した。盛土管理表作成のための標高データ抽出アルゴリズムの完成度を高めることができ、本システムにより転圧判定を行ったエリアにおける盛土管理表を作成可能な環境を得ることができた。

以上の検討から、定点データの抽出法としては、締固め機械（振動ローラ）の振動輪幅が $L(m)$ で、規定の締固め回数を N とした場合、以下の手順が適切であることを確認した。

- 1) 測点と軌跡データの水平距離を算出
- 2) 測点からの半径 $L/2(m)$ 以内のもののうち、距離の短い N 番目までのデータを検索
- 3) 2)に該当する N 個のデータの平均標高を採用

(3) 締固め管理システムを利用した沈下計測による盛土品質評価法の提案

従来から密度、含水比測定に代わる品質管理法として、締固め作業によって生ずる地表面の沈下量を測定する方法が論じられた。しかし、沈下量の計測は、光学式レベル計などを用いて計測する必要があったため、品質規定方式と同様にサンプリング測定に留まる他、省力化と迅速性の面でも課題が残っていた。そこで、施工規定方式で採用している GPS による締固め機械の走行データを利用し、締固め機械運転中の鉛直方向の変化を連続的に計測することによって沈下量を算出し、盛土全面にわたり迅速かつ容易に「施工品質」と「盛土品質」を同時に把握することができる、より高度な管理手法の実現可能性について実験により検討した。

実験の目的は、締固め作業時に生じる地表面の沈下量が、移動中の振動ローラの GPS 測位(RTK-GPS)データによってどの程度計測することができるかを確認することである。このため、実験ヤード(20m×28m)内にマーキングした 15 箇所で、盛土厚さを変えながら、一般に沈下量計測で用いられる光学式レベル計による水準測量データと、走行中の GPS データの中から測点の平面座標値に最も近い計測点の標高データとを比較し、評価する方法を採った。

実験の結果、現状の GPS による鉛直方向の計測精度では、4～6cm という沈下量計測に適用することは難しいことが分かった。しかし、現状でもマクロ的には沈下の傾向をつかむことはでき、沈下量－締固め量－盛土品質を推定することの可能性を確認した。

(4) 規定転圧回数の合理的な更新方法の提案

盛土締固め管理システムを用いた施工規定方式の品質管理では、工事当初に締固めに関するモデル施工（転圧試験）を行って、施工方法（敷均し機種、敷均し厚、転圧機種、転圧回数など）を決定する。施工規定方式においては、当初決定された規定転圧回数などの施工方法が適切であることが前提である。したがって、大規模な土工事にあつては、施工中に所定頻度で盛土材の材料試験を行って盛土材の性状を監視し、それが工事当初から変化したと判断した場合には、モデル施工を実施し直して、当初決定された規定転圧回数などの施工方法を見直す必要がある。しかしながら、モデル施工は、工事着手時の実施は最低限必要であるにせよ、多大な費用や時間を要することから、施工中における再実施は負担が大きい。このことが、乾燥密度などの品質指標を盛土上で事後測定する従来の品質規定方式から、盛土締固め管理システムを用いた施工規定方式に全面的に移行するうえでの、障害の一つとなっている。

このため、施工中にモデル施工に代わって規定転圧回数の妥当性を検証する方法として、モデル施工を模擬した実用的な室内試験（模擬転圧試験）を提案した。模擬転圧試験は、通常の突固め試験（JIS A 1210）と同一の試験用具（モールドおよびランマー）を用いて、自然含水比の土を突固めるものである。工事当初にモデル施工と模擬転圧試験を併せて行い、モールド内の土の単位体積当りに与える突固め仕事量と、現場における転圧回数との対応関係を求めておく。これによって、施工機械（敷均し、転圧）および敷均し厚に変更がない限り、以後はモデル施工を行わずに、模擬転圧試験のみからモデル施工結果を予測し、現行の規定転圧回数の過不足を判断することができる。

室内試験の突固め仕事量と、現場の転圧回数とを対応付ける試み自体は、特に目新しいものではないが、同等の締固め効果を与える現場転圧回数と突固め仕事量との間に必ずしも比例関係を仮定していないこと、言い換えれば、施工時の締固め効果として転圧機械のみならず敷均し機械を考慮している点が、提案手法の特徴である。これにより、提案手法は現場施工の多様な実態を反映した実用的な方法となっている。

複数の盛土材に対して、モデル施工と模擬転圧試験を組合せて実施し、比較分析した結果、提案手法の有効性が確認された。すなわち、模擬転圧試験をモデル施工の代用として用いることの実用性を示した。提案手法の実用化により、盛土締固め管理システムを用いた施工規定方式において、工事当初を除いてモデル施工が原則不要となる。このため、提案手法は同システムの一層の普及展開に貢献するものと期待される。今後のデータの蓄積により、提案手法のさらなる実用性の検証が望まれる。

(5) 締固め管理システムの山間部における適用性向上に関する提案

締固め管理システムの適用に際しては、RTK-GPSの原理から同時に5基以上のGPS衛星の観測が行なえ、現場基準点から途切れることのないデータ伝送が実現できることが基本条件

である。しかし、実際の工事現場で常時盛土ヤードの全域にわたって良好な条件を備えた場所は多いとは言えない。このため、計測データの欠落が生じることがあり、RTK等の従来管理方法の一時的使用が対応策として提案されているが、費用の増加、データ整理の煩雑化等が問題となっていた。そこで、RTK-GPS では最低 5 基必要であるのに対して、GPS 衛星基数が 1 基少なくても済み、基準点からのデータ伝送の必要がない単独測位法の適用性を検討した。

施工現場において、1 周 400m 程度の周回走行中のデータを RTK-GPS によるものと単独測位によるデータを同時に測定すると共に、測定に使用する人工衛星をソフト的に制限して人為的に一時的な捕捉衛星の減少を再現し、その有効性を調査した。

この結果、ある程度の短時間（10 分間程度）であれば、単独測位データは平面方向でリアルタイム (RTK) GPS 測位データと一定の差で計測できることが分かったため、単独測位を利用した下記の運用手法を提案し、締固め管理システムの適用範囲を拡げた。

- ① RTK 測位が可能な間は、その XY 座標を採用
- ② 観測できる衛星数の減少などにより RTK 測位が維持できなくなった場合は、単独測位データと直前の RTK 測位データとの差 Δa を定数として、単独測位データから Δa 分シフトした XY 座標を採用
- ③ RTK 測位が不能の間は、②同様に暫定較差 Δa だけ単独測位データをシフトして採用
- ④ RTK 測位が復帰した場合、その XY 座標を即時採用

ただし、鉛直方向は単独測位データの時間変化が激しいため、採用することは出来ない。

(6)リアルタイム GPS 測位の新たな精度向上策に関する提案

土木施工分野において GPS 測量、特にリアルタイムで数 cm の精度で 3 次元位置が計測できる RTK-GPS 測量は情報化施工に不可欠な移動体計測には必須の技術となっている。しかし、より精密な測量・計測が必要な場合にはまだ光学測量が使用されていた。しかし、光学測量機器は計測範囲が GPS に比べて著しく狭くなり、操作性も悪くなることや、作業によって使用する計測機器を代えることは、非効率であり、経済性も低下する。また、大規模土工事以外にも海工事などは、測量基準点からの距離が大きくなり高精度な計測ができないという課題や、海上での位置計測の場合、光学測量の精度を確保する目的で構築される海上測量櫓が非常に高価でありながら、波浪による動揺を完全に取り除くことは困難であるなどの問題があった。

このため、情報化施工の更なる効率アップや、海工事等における従来の光波測量技術への問題を解決するため、リアルタイム GPS の高度化（長距離での高精度化）の可能性を実験的に検証した。FKP 方式ネットワーク型リアルタイム GPS における計測範囲限定の基準点網再構築、及び複数の固定局の同時利用の RTK-GPS 方式 (Multi Baseline RTK-GPS) による性能向上への効果を実験的に検討した。

その結果、FKP 方式ネットワーク型 RTK-GPS の利用により、標準偏差水平 1cm、標高 2cm

の精度で計測できることを確認した。また、FKP の基準点網を観測域周辺に限定して構築することにより、従来よりもフィックス時間で 50%、測位精度で 20% 程度の性能向上の可能性があることが分かった。また、Multi Baseline RTK-GPS を使うことにより、1 つの固定局の測定に比べて、標準偏差で平均 25% 程度、最大で 40% の改善を確認した。

(7) 海外工事における GPS の活用方法の提案

海外に進出する機会が急速に増大しつつある我が国の建設業界であるが、我が国の建設技術を我が国と同じ水準で情報化施工技術が適用できる環境が整っているとは限らない。GPS の適用にしても同様であり、国内で標準として適用される RTK-GPS の使用するための必須インフラとなる公的基準点が整っていないことも多い。一方で、海外工事では施工範囲が広い大規模な土工事を伴うことが多いため、施工管理に GPS の活用が強く望まれる傾向にある。このギャップを埋める具体的方策として、アルジェリア東西高速工事における IT 導入検討を行った。

① 広域における低信頼公的基準点の取扱いと現場運用方法の検討

信頼性の高い水準点がないため、GPS 測量による緯度・経度データとともに、汎世界的なジオイドモデルである EGM96 を用いて、広域にわたる水準データの整合を取った。

② 長距離 RTK-GPS 測量の実情と活用方法の検討

通常、RTK-GPS の適用範囲は、基準点から数 km 以内とされており、日本国内の実績を調べたところ、この範囲外で実施した報告は見当たらなかった。このため、基準点から計測点から計測点までの距離が 10km を超える場合に生じる誤差（バラツキ）の評価を実験によって確認し、現場の測量基準点やリアルタイム性を生かす簡易測量の運用法を決定した。

6.2 情報化施工技術の展望

本節では、現在、国交省を中心として検討されている、建設生産性工事用のための情報化施工システムの普及・展開に対する課題を上げる。

また、これまで実施してきた、情報化施工システムの開発を踏まえ、施工会社にとって、情報化施工技術の最終目標として上げられている、『建設現場の自動化、無人化』による施工技術の革新に関して、展望する。

6.2.1 情報化施工の普及に向けた課題と対応策¹⁾

情報化施工技術は実際の工事に適用し普及させることが重要である。しかし、3章でも述べたように、現状では情報化施工の導入を妨げている理由として下記の事項が挙げられる。

① 施工環境に関する理由

- ・ 施工規模が小さく、導入コストに見合わない
- ・ 工期短縮・品質向上が施工業者の直接的なメリットにつながらない
- ・ 従来方法でも施工が可能なため、導入意欲が湧かない

② 発注業界環境に関する理由

- ・ 施工管理を合理化しても監督・検査は従来通りのため、検査のために測量杭を設置することや、検査装置が別途用意することなどが要求され、メリットが低減してしまう

③ 機材、他に関する理由

- ・ 機器導入コストが高い
- ・ 機材・装置を扱える技術者が不足している

これらの問題点に対して、克服すべき課題を挙げ、その対策を明らかにすることが重要である。ここでは、施工企業等のみならず発注者及び、共通する課題と対策について考えるところを記す。

(1) 工事発注者の課題

a. 施工管理手法および監督・検査の情報化施工への対応

情報化施工の導入により得られる施工データは、従来の施工管理手法を大きく変える可能性を有している。例えば、盛土における締固め管理は、盛土の品質を確認するために実施するもので、従来の品質規定方式と、情報化施工システムの一つとして開発した締固め回数管理を基本とした施工規定方式がある。施工規定方式は、これまでも述べたように、使用する締固め機械、1層の撤出し厚さ、締固め回数等の施工法を規定し、規定どおりに施工できているか確認する方法である。情報化施工により、撤出し厚さや締固め回数をブルドーザや振動ローラの稼働状況から把握できれば、締固め品質を確認するための検査・立会いの頻度が低減できる。さらに、盛土材料の種類や土の含水比の変化を連続的に把握し、それに応じた所定の締固め度の管理が実現すれば、密度試験の代替となる可能性がある。また、連続的な施工デー

タを監督・検査に適用することにより、工事発注者として求める出来形・品質が実現していることを、より確実に確認できることになる。

しかし、施工データに対する工事発注者、施工者の共通理解と、情報化施工に対応した施工管理手法が整備されなければ、施工者に二重の施工管理を求めることとなり、本来の導入目的が達成できない。第3章でも述べたが、施工管理を合理化しても監督・検査は従来通りのため、検査のために測量杭を設置することや、検査装置が別途用意することなどが要求されると施工者のメリットが低減してしまう。

このため、情報化施工を用いた施工管理を的確にかつ効率的に実施できる施工管理要領やマニュアルの整備を行うことと共に、情報化施工に対応した監督・検査を行うためには、発注者側の技術力の向上が不可欠である。

b. 施工データの受発注者間の共有

施工で得られる各種の施工データを受発注者間で共有し、監督・検査に用いるために監督・検査に必要な情報や責任分担の考え方、情報に対する要求精度や頻度、情報の利用先などのルールを整備することが重要である。また、現状は一つの建設プロジェクトに対して、多くの施工業者が分担しているので、異なる施工会社から提供される施工データを発注者側で確認するためのデータフォーマットや信頼性の確保対策なども検討する必要がある。

c. 総合評価方式における技術提案に対する適正な評価

総合評価方式において、情報化施工の導入による品質管理の向上に関する技術提案が増えつつある。情報化施工技術が品質に与える影響、コストに与える影響、異なる現場条件での利用可否判断など、提案された情報化施工技術の客観的かつ定量的な評価軸を整備することで、情報化施工の導入に対する適正な評価が進み、施工企業等からより積極的に技術提案がなされることが期待できる。これらの技術提案に対して適正な評価を行うためには、提案技術の成立性や導入効果などに関する情報の収集や検証を行うことが重要である。

d. 情報化施工を前提とした設計基準の見直し

現状の基準類の多くは、従来手法によるノウハウの蓄積を前提に構築されている。このため、情報化施工による施工精度の向上や、新たな品質管理手法に適応した設計基準の見直しについて取り組むことが不可欠である。例えば、盛土工、ダム堤体工等において、以下のような研究を実施することが考えられる。

(盛土工)

施工エリア全体において多数点の計測が簡単に行えるため、施工データの空間的かつ即時把握が可能となる。これによって、これまで行われてきたような、サンプリング計測によって最低下限値を下回るかどうかというような管理手法ではなく、盛土全体が平均的に所要の強度に仕上がっているかどうかを検証できる可能性がある。また、盛土施工過程での敷均し・締固め方法などの見直しや、狭小で締固め不良となり易い構造物の周辺などの管理に対応すること

で、きめ細かく、かつ効率的な締固め管理の実現も期待できる。

(ダム堤体工)

従来よりも精度の高い施工が実現することで、これまで設計で考慮されてきた施工のばらつきに対する安全率についての考え方を見直すことが可能であると考えられる。これによって、材料の使用量削減や施工効率向上によるコスト削減の可能性がある。

e. 情報化施工に必要な3次元データ作成における設計業務との連携

情報化施工技術を導入するには、建設機械に3次元の設計データを入力する必要がある。しかし、現在このデータ入力、発注者から提供される設計図書(平面図、縦断図、横断図等)から読み取り、手作業で作成している非効率な状況にある。施工での利用に必要な情報を整理し、数値データとして施工者に提供するための環境を整備することが必要である。

f. 施工データの有効活用

従来の施工管理では、取得したデータを工事の施工管理に必要な帳票等に加工して記載・作成されており、この用途以外の活用が困難であった。このため、例えば、以下のような活用方策について研究を実施する必要がある。

(出来高部分払方式への活用)

工事出来高に相当する正確な工事数量の確認、算出を正確かつ容易にするために、情報化施工により得られる出来形データの活用を図る。

(工事間でのデータ連携)

一つの工事の中で異なる施工会社が実施する前工事・後工事間での施工データを連携し、工事全体の効率化や品質確保を図る。

(維持管理業務での活用)

完成後の維持管理業務に施工データを活用し、点検等に管理基準値データとして活用することにより、効率的・戦略的な維持管理を行い、ライフサイクルコストの削減を図る。

(2) 施工企業等の課題

a. 分かりやすい技術情報の提供

情報技術の革新は非常に速く、各社で情報技術の名称や機能名が不統一、公表資料が分散している面があり、工事発注者が評価・判断するために必要な、利用可能な技術やその効果についての情報がまとまっていない。各社が販売・導入している情報化施工の技術内容やその導入効果、発注者の評価、海外での導入事例や効果、導入の理由などを収集し、導入を検討している施工企業や発注者が容易に参照できる仕組みを構築する必要がある。

b. ハード・ソフトの普及促進

情報化施工に対応するために建設機械の改造(制御機器の搭載等)にコストがかかるだけでなく、情報化施工に対応した建設機械の数が少ないため、現場への輸送コストがかかることなどが、普及の最大の阻害要因となっていると考えられる。

今後、大規模工事だけでなく、中小規模の現場へ情報化施工を普及させるには、IT機器の搭載が可能な建設機械の拡充をはじめ、情報化施工関連機器、ソフトウェアのリース・レンタルの拡大等により、システム導入コストの低減方策が不可欠である。

(3) 共通の課題

a. 技術者の育成

情報化施工を構成する主要技術は、機械制御技術、油圧制御技術、GPS・TSによる測量・測位技術、3次元設計データを扱う情報利用技術など多岐にわたっている。現在は、情報化施工を導入している施工企業の企業内教育や測量機器メーカーの製品講習会などを通じて、現場の技術者やオペレータを育成している状況にある。

情報化施工に対する国の考え方を見ると、製造業におけるCAD、NCの導入から、自動化・ロボットにより画期的に生産性を向上させた実績をその手本として、建設における『生産の変革』を情報化施工に求めていると思われる。しかし、製造業でもその変化の影響で、いわゆる技能工からコンピュータや自動制御技術者へと工場の主役が代わってきたことを認識しなければならない。すなわち、情報化施工を展開するためには、これまで述べた指針や基準、要領などとともに、実際に技術を創出していく技術者の育成が急務であるとともに、現場技術者の人員構成も変えていかなければならない。少なくとも、育成費用は国が拠出するなど、導入企業に負担を与えない体制を整えることが必須であると考ええる。

b. 普及のための情報発信

情報化施工に対する施工企業及び発注者の認知度は依然として低く、研究開発の成果や施工実績、費用対効果など情報化施工の導入を検討するための情報の入手が困難な状況にある。今後、産・学・官それぞれにおいて、雑誌、シンポジウム、展示会、技術論文など従来の広報媒体を用いた活動をさらに強化するとともに、技術的内容がより具体的に理解できる場を広く提供する機会として、情報化施工の導入現場を積極的に公開することも必要であると考ええる。

6.2.2 建設現場の自動化、無人化による施工技術の革新を目指して

情報化施工システムの研究の背景として、土木施工における、劣悪な作業環境であり危険・苦渋作業があることや、他産業に比べてITの導入が遅れ、業務の効率化、コストの低減、品質向上のための社会的要求があったことなどが上げられる。

本研究で開発した、

- ・ 測量位置誘導システム(3D-Navi)
- ・ 3次元施工システム(3D-MC):3次元施工ブルドーザ, 3次元施工ショベル
- ・ ダンプトラックナビシステム
- ・ 盛土締固め管理システム

等のシステムを導入することにより、土工事現場での多くの作業において、作業効率を上げる、あるいは、技術や熟練を必要としていた作業をITを用いることによって簡単に誰でもが扱えるようになった。これによって、大規模土工事では「情報化施工システム」の有効性を示すことができ、今後の建設現場の一つのスタイルを提示することができたと考える。

しかし、将来的な労働人口の減少への対策としては、省人化を一層進める必要がある。また、建設業に優秀な人材に参加してもらうためにも、いつまでも3Kの代表的な職場として取り上げられていてはならない。労働集約型から知識・技術集約型に移行し、魅力ある産業にしていくことが筆者の責務であると考ええる。

本項では、そのような背景の下、建設現場の究極の姿を構築するための技術となる、施工の自動化技術を外観する。

現在人手で行っている全ての作業を自動化、機械化することは技術的、経済的に困難であるため、現状の情報化施工システムを発展させ、徐々に自動化、無人化率を上げていくことが賢明である。特に情報化施工システムにおける3次元施工システム(3D-MC)の自動化率を向上させることによって、次のステップに繋がると考える。

現状の3次元施工システムでは、基本的には建設機械の運転は人間によって行われる。機械を制御して行われることは主として熟練を要する整形操作である。すなわち、操作の微妙な調整を自動的にに行っているのである。

例えば、建設機械を作業現場まで走行させることは人間にとっては易しいが、ロボット技術でこれを行うことは現状ではほとんど不可能である。すなわち、目的地までのルート認識、走行路の選択、周辺の安全確認、等々を行うためには多くのセンサ、計測装置とそれによってもたらされる膨大な情報、及びそれら进行处理するきわめて高速のコンピュータが必要となるからである。このため、施工の自動化に関しては、人間が不得意な、危険作業、繰り返し作業、長時間作業、夜間作業などの部分を軽減する方向を優先的に実施すべきと考える。

図 6.1 はそのイメージの一例を示したもので、ここでは先ず人間は現場に行かず、作業環境の良い場所から遠隔で制御している。

建設機械を作業位置まで持っていけば、あとの繰り返し作業は自動的に機械に行わせようというシステムである。作業にしたがって、施工対象の形状が変化していくが、それらの微小変化は作業しながら自律的に認知して、作業位置や姿勢を変えて継続して施工を行う。自律作業とは、油圧ショベルのバケットやブームなどの作業装置について、動作を計画し状況により計画を修正しながら掘削・積込動作を自律して行うことである。

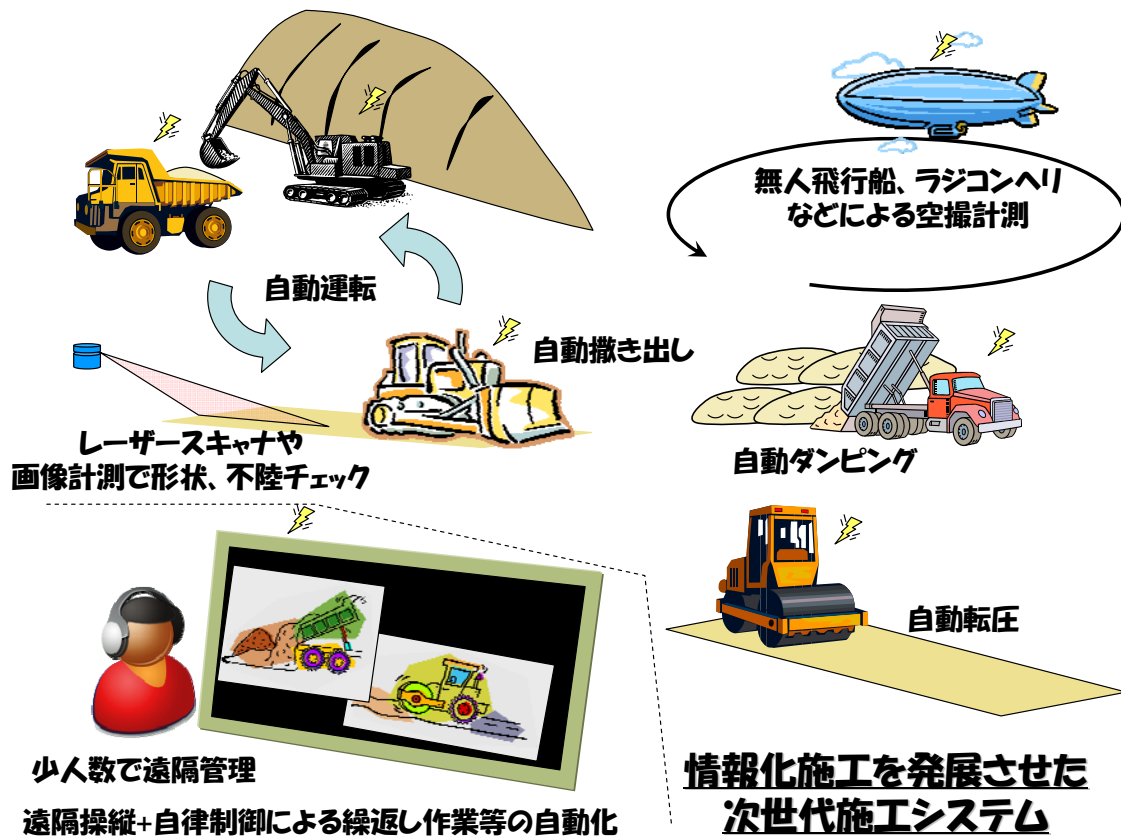


図 6.1 ロボット等による次世代施工システムのイメージ

これらが実現すれば、一人で複数の機械を操縦することが出来るようになり、効率化が上がる。データは全てデジタルで管理され、図面は不要となる。また、ここでは表していないが、検査なども IT 機器で計測された出来形、出来高あるいは、施工管理データによって行われる。

このようなシステムを目指し、そのために必要な要素技術を洗い出し、研究開発のロードマップを設定し、実現していくことが、今後の建設業が魅力ある産業として維持・発展していく上で、非常に重要な活動になる。そのためには、監督官庁の指導・支援は言うに及ばず、単一企業の活動ではなく、また、建設業界の範囲だけでなく、電気・電子産業、機械・ロボット産業、情報産業を巻き込んだ活動でなければ実現しないと考える。

情報化施工システムを他に先駆けて実工事現場に適用してきた先駆者として、情報化施工システム導入から現在に至る過程で得られた知見を、施工技術のより一層の変革に生かしてゆきたいと考える。

[参考文献]

- 1) 「情報化施工推進戦略」, 情報化施工推進会議, p.3, 2008 年 7 月